

## Trabajo Fin de Máster

Cargador de paquetes de baterías de NiMH de  
24 V, 10 Ah para vehículos eléctricos

Autor

Carlos Magarín Martín

Director

José Ignacio Artigas Maestre

Máster en Ingeniería Electrónica  
Escuela de Ingeniería y Arquitectura  
Zaragoza, Marzo de 2013



# **Cargador de paquetes de baterías de Ni-MH de 24 V, 10 Ah para vehículos eléctricos.**

## ***RESUMEN***

En este documento se describe el proceso de diseño de un convertidor Flyback empleado como cargador de baterías de un vehículo eléctrico.

El cargador está pensado para funcionar a partir de la red eléctrica de 230 V y poder suministrar a su salida una tensión máxima de 34 voltios y una corriente máxima de 4 amperios. Variando el índice de carga se estima poder cargar los paquetes de baterías en un tiempo aproximado de tres horas.

Los paquetes de baterías están compuestos por un total de 20 baterías de 1.2 V cada una conectadas en serie, formando así un bloque de 24 V.

El paquete de baterías a cargar es de níquel-hidruro metálico (Ni-MH), material con gran capacidad de carga y poco efecto memoria aunque presenta una tasa de autodescarga elevada.

Para cargar este tipo de baterías se requiere una corriente continua elevada, con tensiones entre 20 y 34 V, monitorizando la tensión y la temperatura de la batería para evitar su sobrecarga y asegurar la carga óptima. Además de estas dos magnitudes también se ha colocado un sensor para medir la corriente que atraviesa la batería.

El tratamiento de esta información se recoge con un microcontrolador de la familia MSP430 de *Texas Instruments*. Éste procesará la información para controlar el ciclo de trabajo del interruptor de la etapa de potencia.

Para el diseño de la etapa de potencia se ha empleado el programa *Mathcad*, distribuido por *Parametric Technology Corporation*. Con este programa se han dimensionado todos los componentes del circuito. También se han utilizado otros programas informáticos para el diseño de componentes eléctricos más concretos como el transformador, para el que se ha utilizado el programa *Ferrite Magnetic Design Tool* de *EPCOS*.

La validación del diseño mediante simulación se ha llevado a cabo con el programa *PSpice A/D* de *OrCAD*, en el cual se ha introducido únicamente la parte correspondiente al circuito de potencia con el objetivo de asegurar que la respuesta obtenida a la salida de la fuente es la esperada.

En las simulaciones se presentan datos referentes a tensiones y corrientes de salida del circuito principal y también información del circuito de polarización utilizado para la alimentación del driver que dispara el transistor. También se vigilan las corrientes por el primario y el secundario del transformador para saber el modo de funcionamiento del cargador y por último la tensión en el transistor para controlar que ésta se mantenga dentro de unos márgenes aceptables para la seguridad del propio cargador.

Para la programación del microcontrolador se ha empleado el programa *Code Composer Studio v5*. Es un entorno de desarrollo para crear aplicaciones en dispositivos de *Texas Instruments*.

*Mi agradecimiento a los  
maestros de taller por toda su  
ayuda y a José Ignacio por  
todas las horas que me ha  
dedicado para poder seguir  
adelante.*

## *ÍNDICE*

RESUMEN	III
ÍNDICE	V
LISTA DE SÍMBOLOS Y ACRÓNIMOS	VII
LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE TABLAS	XI
<b><u>CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN GENERAL Y OBJETIVOS</u></b>	<b><u>13</u></b>
1.1 - INTRODUCCIÓN	14
1.2 - OBJETIVOS DEL TRABAJO DE MÁSTER	15
1.3 - LEGISLACIÓN Y OTRAS REGULACIONES	15
<b><u>CAPÍTULO 2 INNOVACIÓN Y NOVEDAD DEL PROYECTO</u></b>	<b><u>17</u></b>
2.1 - ESTUDIO DEL ESTADO DEL ARTE	18
2.2 - AVANCES CIENTÍFICOS Y/O TÉCNICOS QUE PROPONE EL PROYECTO	18
<b><u>CAPÍTULO 3 DESARROLLO DEL PROYECTO</u></b>	<b><u>19</u></b>
3.1 - INTRODUCCIÓN	20
3.2 - DIAGRAMA DE BLOQUES GENERAL DEL SISTEMA	20
3.3 - FASES Y TAREAS Y SUS INTERACCIONES	21
3.4 - CLASIFICACIÓN DE BATERÍAS	22
3.5 - MÉTODOS DE CARGA PARA BATERÍAS DE NI-MH	23
3.6 - MÉTODO DE CARGA SELECCIONADO	24
3.7 - FINALIZACIÓN DE CARGA	25
3.8 - DISEÑO DE LA ETAPA DE POTENCIA	26
3.9 - MODO DE FUNCIONAMIENTO DE UNA FLYBACK	26
3.10 - METODOLOGÍA DE DISEÑO	27
3.11 - ACONDICIONAMIENTO DE LOS SENSORES	31
3.12 - DISEÑO DE LA ETAPA DE CONTROL	31
3.13 - FIRMWARE	32
<b><u>CAPÍTULO 4 SIMULACIONES Y RESULTADOS EXPERIMENTALES</u></b>	<b><u>35</u></b>
4.1 - SIMULACIONES	36
4.2 - RESULTADOS OBTENIDOS	38
4.3 - CONCLUSIONES OBTENIDAS A PARTIR DEL ESTUDIO DE LAS SIMULACIONES.	50
4.4 - MEDIDAS EXPERIMENTALES	51
4.5 - DISEÑO Y MONTAJE DE LA PLACA.	56

<b><u>CAPÍTULO 5 PRESUPUESTO</u></b>	<b><u>61</u></b>
<b>5.1 - ESTIMACIÓN Y CONTROL DE COSTES</b>	<b>62</b>
<b><u>CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES</u></b>	<b><u>65</u></b>
<b>6.1 - CONCLUSIONES</b>	<b>66</b>
<b>6.2 - LÍNEAS FUTURAS</b>	<b>67</b>
<b><u>CAPÍTULO 7 REFERENCIAS</u></b>	<b><u>69</u></b>
<b><u>ANEXOS</u></b>	<b><u>71</u></b>
<b>ANEXO I: DISEÑO DEL CIRCUITO DE POTENCIA</b>	
<b>ANEXO II: DIAGRAMAS DE FLUJO DEL PROGRAMA</b>	
<b>ANEXO III: CÓDIGO DEL PROGRAMA</b>	
<b>ANEXO IV SIMULACIÓN EN ORCAD PSPICE A/D</b>	
<b>ANEXO V MANUAL DE USUARIO</b>	

## ***LISTA DE SÍMBOLOS Y ACRÓNIMOS***

A/D	Analógico digital
AC	Corriente alterna
C	Corriente que descargaría la batería en una hora en condiciones nominales
CCM	Modo de funcionamiento continuo
CI	Circuito integrado
D	Ciclo de servicio: $D = t_{on}/T$
DC	Corriente continua
DCM	Modo de funcionamiento discontinuo
EMI	Interferencias Electromagnéticas
f	Frecuencia
I	Corriente en régimen estático
IC	Índice de carga de la batería. Corriente de carga normalizada a C
I <sub>o</sub>	Corriente de salida
I <sub>p</sub>	Corriente de pico
JTAG	Joint Test Action Group. Puerto para testear PCBs
Li	Litio
L <sub>leak</sub>	Inductancia de fuga
L <sub>M</sub>	Inductancia magnetizante de un transformador
NiCd	Níquel cadmio
Ni-MH	Níquel hidruro metálico
NTC	Termistor. Sensor de temperatura resistivo cuya resistencia disminuye con la temperatura
P	Potencia eléctrica
Pb	Plomo
PCB	Placa de circuito impreso
PWM	Modulación por ancho de pulsos

R	Resistencia eléctrica
SLA	Batería de plomo sellada
T	Periodo
$t_{on}$	Intervalo de tiempo en el que un interruptor permanece encendido
$t_{off}$	Intervalo de tiempo en el que un interruptor permanece apagado
V	Tensión en régimen estático
Vref	Tensión reflejada
$\Delta$	Variación



## LISTA DE FIGURAS

Fig. 1 – Diagrama de bloques del cargador .....	20
Fig. 2 – Estructura del proyecto .....	22
Fig. 3 – Método de carga seleccionado para la batería .....	25
Fig. 4 – Detección de finalización de la carga por $-\Delta V/\Delta t$ .....	25
Fig. 5 - Convertidor buck-boost [12] .....	27
Fig. 6 – Esquema básico de la etapa Flyback [12] .....	27
Fig. 7 – Formas de onda en modo CCM para etapa flyback [12] .....	28
Fig. 8 – Formas de onda en modo DCM para etapa flyback [11].....	29
Fig. 9 – Esquema completo del cargador .....	30
Fig. 10 – Diagrama del circuito con microcontrolador.....	32
Fig. 11 – Estado 1, simulación 1.1 .....	38
Fig. 12 – Estado 1, simulación 1.2 .....	39
Fig. 13 – Estado 2, simulación 2.1 .....	40
Fig. 14 – Estado 2, simulación 2.2 .....	41
Fig. 15 – Estado 3, simulación 3.1 .....	42
Fig. 16 – Estado 3, simulación 3.2 .....	43
Fig. 17 – Estado 4, simulación 4.1 .....	44
Fig. 18 – Estado 4, simulación 4.2 .....	45
Fig. 19 – Circuito sin clamp ni snubber paso a off.....	46
Fig. 20 – Etapa con circuito de clamp.....	47
Fig. 21 – Etapa con snubber paso a off .....	48
Fig. 22 – Formas de onda del diodo de salida .....	49
Fig. 23 – Montaje del cargador el protoboard .....	51
Fig. 24 – Bancada de ensayos.....	52
Fig. 25 – Señales de corriente y tensión del transistor con $I_o = 4\text{ A}$ $V_o = 32\text{ V}$ .....	53
Fig. 26 – Tensión del transistor, corriente de salida $I_o = 4\text{ A}$ .....	53
Fig. 27 – Corriente por el transistor y tensión por el diodo de salida .....	54
Fig. 28 – Demostración de modo de funcionamiento discontinuo DCM.....	55
Fig. 30 – Bucles de corriente en la etapa flyback [5].....	56
Fig. 31 – Filtro de entrada y componentes de seguridad eléctrica .....	57
Fig. 32 - Cara bottom diseñada .....	58

Fig. 33 - Cara top diseñada .....	58
Fig. 34 - Cara bottom fabricada.....	59
Fig. 35 - Cara top fabricada .....	59

## ***LISTA DE TABLAS***

Tabla 1 - Comparación de las etapas reguladas mediante PWM.....	26
Tabla 2 – Especificaciones iniciales de la flyback .....	28
Tabla 3 – Componentes y valores para la simulación en PSpice.....	37
Tabla 4 – Simulación 1.1.....	38
Tabla 5 – Simulación 1.2.....	39
Tabla 6 – Simulación 2.1.....	40
Tabla 7 – Simulación 2.2.....	41
Tabla 8 – Simulación 3.1.....	42
Tabla 9 – Simulación 3.2.....	43
Tabla 10 – Simulación 4.1.....	44
Tabla 11 – Simulación 4.2.....	45
Tabla 12 – Circuito sin snubber ni clamp .....	46
Tabla 13 – Circuito con clamp .....	47
Tabla 14 – Circuito con snubber de paso a off.....	48
Tabla 15 – Formas de onda diodo de salida.....	49
Tabla 16 – Presupuesto del proyecto.....	63



CARGADOR DE PAQUETES DE BATERÍAS DE NIMH DE 24 V, 10 AH PARA  
VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

---

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN GENERAL Y OBJETIVOS

## ***1.1 - INTRODUCCIÓN***

Aunque es considerado un asunto menor, el diseño de cargadores es un tema que puede afectar seriamente al coste y prestaciones de cualquier equipo. El diseño utilizando transformadores trabajando a 50 Hz produce soluciones que suelen ser inconvenientes, tanto por su precio, como por peso y volumen, además del bajo rendimiento que se obtiene, generando así una gran cantidad de calor.

El interés por el correcto mantenimiento de las baterías ha sido siempre elevado, ya que su vida útil depende de ello. Entender la forma de carga de las baterías, y en nuestro caso las de Níquel-Hidruro Metálico (Ni-MH), es fundamental para diseñar un cargador adecuado a cada tipo de baterías.

La batería objeto del presente trabajo se compone de un conjunto de celdas conectadas en serie, cada una de las cuales tiene un voltaje nominal de 1.2 V. Cada celda tiene una capacidad de 10 Ah, lo que quiere decir que es capaz de entregar una corriente de 10 A durante una hora.

El calor es el gran enemigo de las baterías y aún más de las de Ni-MH. Si se carga una batería con una corriente elevada y una vez alcanzada la carga máxima se sigue suministrando corriente, ésta se disipará en el interior de la batería en forma de calor, pudiendo deteriorarla o incluso destruirla. En el momento de carga máxima se observa un pico en el voltaje de la batería y luego este voltaje disminuye ligeramente. Otra manera de detectar que la batería está completamente cargada es medir una variación de temperatura de más de 1 °C por minuto. Éste es el momento para interrumpir el proceso de carga.

Si se controlan adecuadamente estos parámetros, para baterías de Ni-MH se permite un proceso de carga relativamente rápido, con corrientes de hasta 1 C, donde C es la corriente que cargaría la batería en una hora en condiciones ideales.

La tendencia de diseño de componentes electrónicos está enfocada en conseguir aparatos cada vez más pequeños, objetivo que va en dirección opuesta al de conseguir cargadores cada vez más rápidos, ya que conseguir una carga de las baterías de forma más rápida conlleva diseñar cargadores de un volumen mayor.

Este proyecto intenta suplir esa necesidad de cargadores de calidad. Para llevar a cabo esta tarea se ha diseñado un cargador con un índice de carga (IC) mayor al de los cargadores comerciales de bajo coste que se pueden encontrar hoy en día.

## ***1.2 - OBJETIVOS DEL TRABAJO DE MÁSTER***

El objetivo de este trabajo fin de máster es aunar dos campos de la electrónica muy diferentes. Por un lado tenemos la etapa de potencia. Esta parte es el bloque principal sobre el que se sustenta el grueso del trabajo. Un mal diseño de esta etapa puede acarrear problemas a lo largo de todo el proceso de desarrollo de los demás componentes del cargador.

Por otro lado tenemos la etapa de control digital. Esta parte de la etapa gira en torno al microcontrolador y los componentes que lo acompañan. Leyendo información proporcionada por los sensores que tenemos instalados en la etapa de potencia podemos saber el estado en el que se encuentra la batería y actuar en consecuencia para así poder realizar una carga óptima.

En conjunto, la mezcla de estos dos grandes bloques da como resultado un cargador inteligente, con una capacidad de carga adecuada para este tipo de baterías y con un coste inferior a los 100 €.

## ***1.3 - LEGISLACIÓN Y OTRAS REGULACIONES***

La normativa que afecta al diseño de cargadores de baterías es la siguiente:

UNE-EN 60335-2-29: Aparatos electrodomésticos y análogos. Seguridad. Parte 2-29: Requisitos particulares para cargadores de baterías.

UNE-EN 15194: Ciclos con asistencia eléctrica.





CAPÍTULO 2 INNOVACIÓN Y NOVEDAD DEL PROYECTO

## **2.1 - ESTUDIO DEL ESTADO DEL ARTE**

En la actualidad hay una gran variedad de cargadores de baterías y también diferentes topologías dependiendo de la batería que están destinados a cargar, pero en la gran mayoría de los casos el diseño de estos cargadores se centra solamente en la etapa de potencia dejando la parte del control de la carga en manos de un circuito integrado analógico que realice todo el muestreo de información y actúe así en consecuencia.

Muchos de los cargadores que se encuentran actualmente en el mercado son para baterías de menos capacidad y tensión que las que se utilizan en el proyecto, ya que son cargadores, en su mayoría, para aparatos de radiocontrol como avionetas o coches teledirigidos. Como ejemplo de los cargadores disponibles en el mercado podemos citar los modelos disponibles en febrero de 2013 en la tienda online [www.all-battery.com](http://www.all-battery.com). Disponen de 20 cargadores para baterías de Ni-MH, de los cuales sólo 2 son capaces de cargar paquetes de baterías de 24 V, y uno de ellos a corriente de 0,5 A. Del resto de cargadores, 15 son para baterías de hasta 12V y 3 son para baterías de 36 y 48V. Solamente el modelo “Tenergy Smart Universal Charger (3.5A) for NiMH/NiCD Battery Packs: 19.2v - 24v” [1] con un precio de 40 dólares, sería adecuado para nuestra aplicación.

Antes de abordar el trabajo fin de máster se probó este cargador en laboratorio (junto con otro similar de 2 A de corriente), comprobando su inadecuación porque terminaban el proceso de carga bastante antes de que la batería estuviera completamente cargada. Era necesario desconectar y reconectar el cargador varias veces para completar la carga de la batería. Este resultado puede tener relación con tratarse de cargadores de bajo coste, cuyo diseño y fabricación puede no haber pasado los procesos de calidad adecuados.

Como conclusión, no se ha encontrado ningún cargador de bajo coste (menor de 100 €) que satisfaga las necesidades de esta aplicación.

La otra solución para cargar baterías de este tipo con garantía es utilizar los denominados analizadores de baterías, que son equipos computerizados para realizar diversos test a las baterías, pero a un coste de cientos o miles de euros [2] [3].

## **2.2 - AVANCES CIENTÍFICOS Y/O TÉCNICOS QUE PROPONE EL PROYECTO**

La pequeña lista mostrada en el estudio del estado del arte es la clase de cargadores de bajo coste que se pueden encontrar hoy en día en el mercado. La mayoría son cargadores que pueden llegar a cargar a altas corrientes pero que no son capaces de cargar paquetes de baterías con un número elevado de celdas como puede ser nuestro caso y los cargadores que si que pueden hacer frente a la carga de un número de celdas elevado con corriente elevada lo hacen de forma poco “inteligente”, utilizando controladores analógicos estándares de bajo coste, que les lleva a dejar las baterías a medio cargar para garantizar su seguridad.

Estas razones nos han llevado a diseñar un cargador controlado con microcontrolador que puede alcanzar las prestaciones requeridas garantizando la carga completa y la seguridad de las baterías. Uno de los motivos para que esta zona de mercado esté sin explorar es la parte económica que afecta a estos cargadores, ya que a mayores prestaciones, mayor será el precio.

Al haber estudiado los diferentes sistemas de carga ya existentes en el mercado observamos que nuestro dispositivo reúne una serie de cualidades que el resto de sistemas no contempla, lo que hace que este producto sea único y aporte un componente novedoso en comparación con el resto de cargadores en el mercado actual.

### CAPÍTULO 3 DESARROLLO DEL PROYECTO

### 3.1 - INTRODUCCIÓN

Este capítulo sirve para explicar de manera clara y ordenada todo el proceso de diseño que se ha realizado para crear el cargador de baterías.

Para situar al lector en los bloques que se han diseñado se ha creado un diagrama de bloques que diferencia claramente cada parte de la etapa. Posteriormente, cuando se explique el diseño de los componentes del cargador se explicarán dichos bloques individualmente.

Para entender por qué hemos diseñado el cargador con unas especificaciones tan concretas hace falta saber qué tipo de baterías queremos cargar, de qué manera se desea cargarla, los riesgos que implica aplicar un determinado método de carga etc.

Para eso se ha realizado una breve descripción de los tipos de baterías que nos podemos encontrar actualmente en el mercado. Un vez que tengamos descrita nuestra batería pasaremos a explicar el método de carga que se ha implementado para obtener una carga óptima y sin perjudicar el estado de la batería.

### 3.2 - DIAGRAMA DE BLOQUES GENERAL DEL SISTEMA

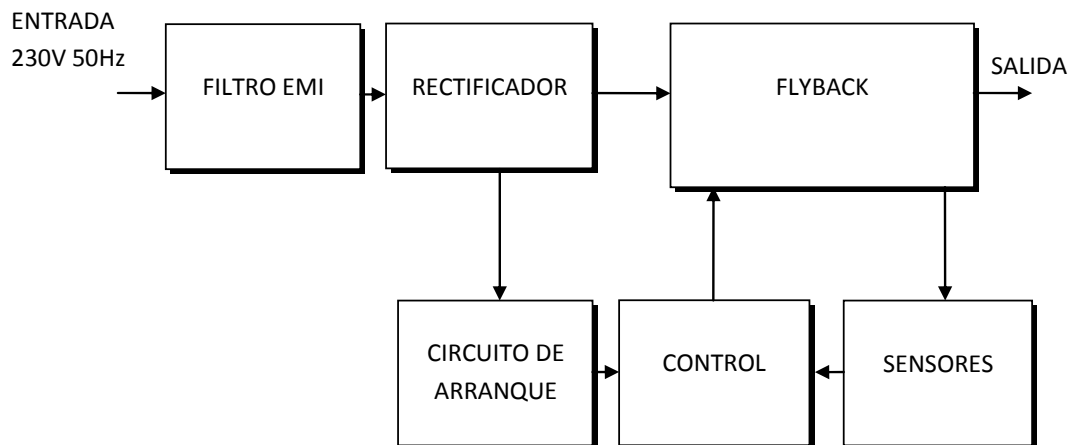


Fig. 1 – Diagrama de bloques del cargador

En la Fig. 1 se puede observar el diagrama de bloques del cargador diseñado.

El diseño del dispositivo se divide en 6 grandes bloques:

1 – Filtro de EMI: Los componentes de este bloque reducen las interferencias conducidas y protegen al resto de la etapa.

2 – Rectificador: En este segundo bloque tenemos un puente de diodos y un condensador para fijar un nivel de continua. El mínimo voltaje DC que es producido por el mínimo voltaje AC es un parámetro muy importante. Una regla que se suele utilizar para el diseño es escoger un condensador de  $1 \mu\text{F}/\text{W}$  para el caso de alimentación a 230V. [4]

3 – Flyback: Este bloque forma el grueso de la etapa de potencia. Dentro de la flyback tenemos diferentes componentes y subbloques: el transformador, responsable de almacenar energía procedente del primario para depositarla en el secundario y así ser capaces de cargar la

batería. El transistor, que será el dispositivo que marque en qué momento el transformador tiene que almacenar energía o entregarla al secundario. El circuito de clamp protege al transistor de la energía almacenada en la inductancia de fuga del transformador. El circuito de snubber protege al transistor de sobreoscilaciones que puedan dañarlo en el paso a off. Por último, el diodo y los condensadores en el secundario del transformador serán los encargados de suministrar una tensión constante a su salida.

4 – Sensores: En este bloque están recogidos los tres sensores que tenemos instalados para enviar información al bloque de control: tensión, corriente de carga y temperatura de la batería.

5 – Control: Formado por un microcontrolador que leerá las señales enviadas por los sensores y decidirá cómo actuar sobre el transistor.

6 – Circuito de arranque: Por último tenemos el circuito de arranque que proporciona una alimentación inicial al driver del transistor al conectar el circuito a la red. En el modo de funcionamiento normal el driver que dispara al transistor está alimentado a través de un devanado auxiliar del transformador. Como al inicio en este circuito no tenemos tensión debido a que no podemos hacer funcionar el transistor sin el propio driver, tenemos que instalar este pequeño circuito que nos ayude a alimentar al driver hasta que la etapa sea capaz de ser autosuficiente. [5]

### ***3.3 - FASES Y TAREAS Y SUS INTERACCIONES***

La planificación es parte fundamental de cualquier proyecto, pero en este tipo de trabajos en los que hay etapas de diseño profundamente diferenciadas es indispensable para conseguir un resultado satisfactorio.

En la Fig. 2 se puede observar en detalle la estructura general del proyecto.

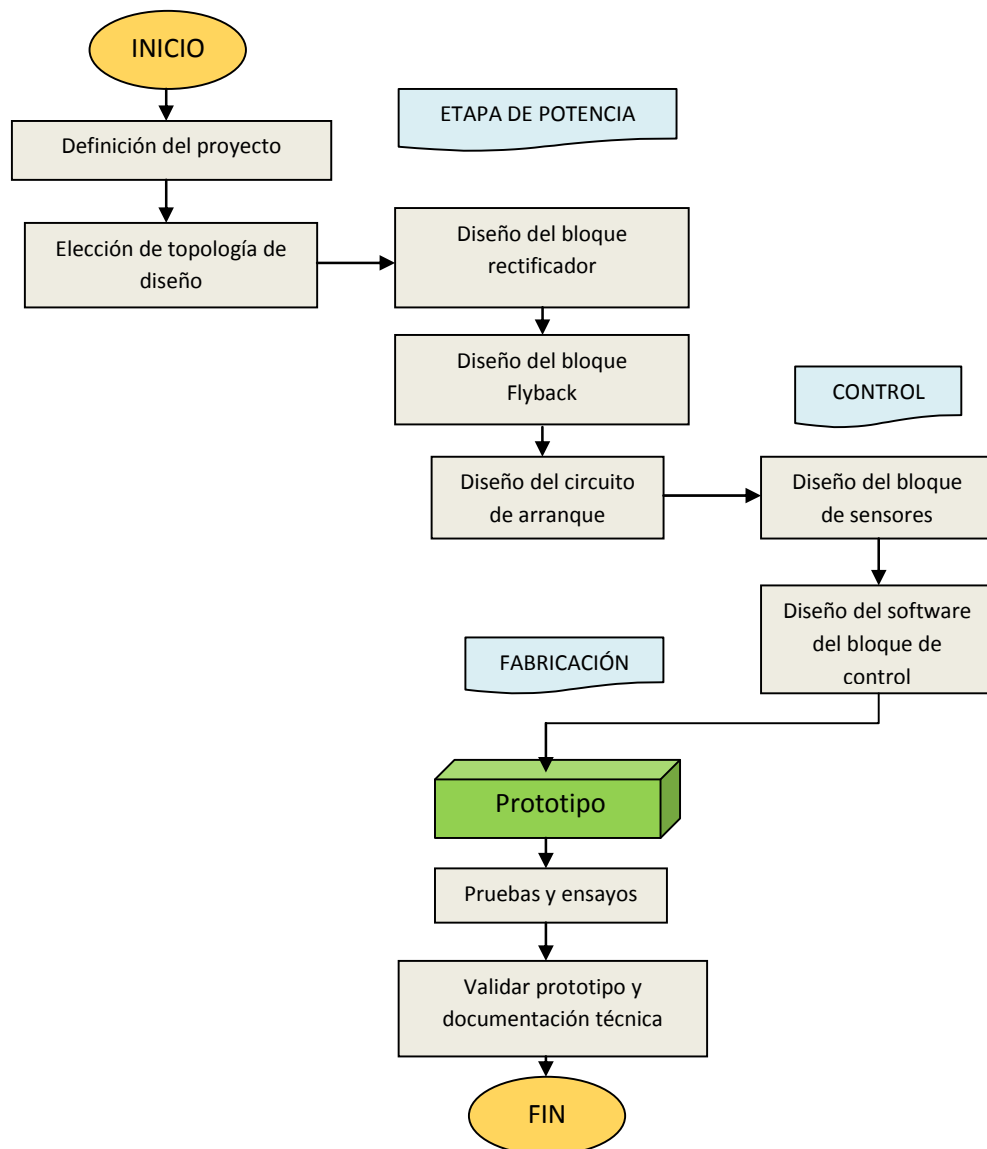


Fig. 2 – Estructura del proyecto

### 3.4 - CLASIFICACIÓN DE BATERÍAS

Actualmente se utilizan baterías recargables para aplicaciones tales como motores de arranque de automóviles, dispositivos portátiles de consumo, vehículos ligeros como bicicletas eléctricas, herramientas y sistemas de alimentación ininterrumpida. También en nuevas aplicaciones como alimentación para vehículos eléctricos están impulsando la tecnología para reducir costes, reducir el peso y aumentar la vida útil.

Los diferentes tipos de baterías requieren diferentes formas de carga y éstas dan diferente tipo de información para indicar que han completado el ciclo de carga.

Hay fundamentalmente cuatro tipos de materiales para crear baterías:

- Baterías de plomo y ácido (SLA): Las más conocidas son las baterías de automóvil. Están formadas por un depósito de ácido sulfúrico y en su interior hay un conjunto de placas de plomo. [6]

- Baterías de iones de litio (Li-Ion): Son unas baterías de gran ligereza, una elevada capacidad energética y poca autodescarga. Otro factor importante de estas baterías es que no poseen efecto memoria. Todas estas características han sido las que han propiciado que estas baterías se hayan instalado en todos los aparatos de electrónica de consumo actuales. También presentan una serie de inconvenientes que hacen que éstas no sean el sistema de almacenaje perfecto, como por ejemplo, el estar fabricadas con materiales inflamables que las hace propensas a detonaciones o incendios. También presentan un número limitado de cargas, mucho menor al de las baterías de níquel-cadmio. [7]

- Baterías de níquel cadmio (NiCd): Estas baterías se usan cada vez menos debido a su efecto memoria y al cadmio, material muy contaminante. Su lugar está siendo ocupado por las baterías de Ni-MH. [8]

- Baterías de níquel-hidruro metálico (Ni-MH): Estas baterías poseen similar densidad energética a las de NiCd y un menor efecto memoria. Su inconveniente es que presentan una mayor tasa de autodescarga. El ciclo de vida oscila entre las 500 y 700 cargas. [8]

### ***3.5 - MÉTODOS DE CARGA PARA BATERÍAS DE NI-MH***

El calor es el gran enemigo de las baterías de NiMH. Si se carga una batería con una corriente elevada y una vez alcanzada la carga máxima se sigue suministrando corriente, ésta se disipará en el interior de la batería en forma de calor, pudiendo deteriorarla o incluso destruirla.

Existen cargadores de baterías comerciales que detectan el momento de carga máxima, pues en ese punto se observa un pico en el voltaje. Estos cargadores permiten un proceso de carga relativamente rápido, con corrientes de 2 a 3 C, para NiCd, y 1C para NiMH. Tras una carga rápida, se observa que las baterías están tibias.

El voltaje para cargar las baterías se mueve en un rango de entre 1.2 y 1.4 veces la tensión nominal de la batería.

En general, un método de carga a voltaje constante no se puede usar para cargas automáticas. Para realizar una carga rápida es aconsejable utilizar cargadores inteligentes para evitar la sobrecarga. Un apunte importante es que no se pueden intercambiar cargadores entre los diferentes tipos de baterías, es decir, un cargador para baterías de NiCd no puede ser usado para este tipo de baterías. [9] A continuación se indican los métodos de carga que se suelen utilizar.

#### **Método de carga por goteo**

Es el modo más seguro de cargar las baterías de Ni-MH, ya que se basa en aplicar un corriente de pequeña magnitud incluso sin tener en cuenta el tiempo de carga. Muchos fabricantes aseguran que la sobrecarga es segura a bajas corrientes, por debajo de 0.1C, aunque por norma general se recomienda limitar el tiempo de carga entre 10 y 20 horas. Algunos cargadores pasan a funcionar con un índice de carga (IC) de C/300 al terminar el ciclo de carga para así contrarrestar la descarga natural de la propia batería.

#### Método de carga de la variación de tensión

Este método es más rápido que la carga por goteo, pero el cargador tiene que saber cuándo terminar la carga para evitar dañar la batería. El método consiste en monitorizar el voltaje de la batería. Cuando la batería se ha cargado por completo, su tensión disminuye ligeramente. Esta disminución de tensión puede ser casi inapreciable en las baterías de Ni-MH cuando la corriente de carga es pequeña. Lo que se suele hacer es controlar la tensión y terminar la carga cuando la variación de tensión con el tiempo es igual a cero, pero se corre el riesgo de provocar un corte en la carga de forma prematura.

Con este método se puede aplicar un índice de carga mucho mayor, llegando a un valor de 1 C. Con este índice de carga la caída de tensión al final del proceso de carga está aproximadamente entre 5 y 10mV por celda. Para realizar este tipo de carga se tiene que aplicar corriente constante durante la carga.

#### Método de carga de la variación de temperatura

Este método es similar al anterior. Cuando la batería no está completamente cargada, la mayoría de la energía suministrada se convierte en energía almacenada. Sin embargo, a partir del momento en que la batería se ha cargado por completo, la energía suministrada se disipa en forma de calor en la batería. El incremento en la temperatura de la batería puede ser detectado por un sensor. Por norma general una variación de 1 °C por minuto indica que se ha alcanzado el final de la carga.

Con el método de variación de tensión y el método de variación de temperatura se recomienda, una vez que se ha detectado que la batería está cargada, aplicar por un tiempo el método de carga por goteo. [10]

En nuestro caso, el control que se ha realizado es una combinación entre la variación de tensión y la variación de temperatura para no poner en peligro a la batería en ningún momento.

A continuación se explica de forma detallada la forma de carga que se va a realizar.

### **3.6 - MÉTODO DE CARGA SELECCIONADO**

El proceso de carga que se ha llevado a cabo para cargar nuestra batería está dividido en cuatro etapas.

- La primera es una etapa de precarga, se trata de acondicionar la tensión de la batería a unos límites seguros para poder aplicar la carga con corriente elevada. Se aplica cuando la batería está completamente descargada, es decir, cuando la tensión es menor a 0.8 veces la tensión nominal de la batería. El índice de carga aplicado en este tramo inicial es de C/8. En nuestro caso, se aplicará una corriente constante de 1.25 A hasta que se alcance una tensión de 19 V.

- La segunda etapa es la llamada etapa de carga. En esta parte de la carga se puede aplicar un IC desde C/4 hasta 1 C. En este diseño se ha decidido aplicar un IC de C/2.5, es decir, una corriente de 4A desde que la tensión en bornes es superior a 19 V hasta que se detecta que se ha de producir el cambio de estado mediante los métodos de variación de tensión o variación de temperatura antes nombrados.

- La tercera etapa, como ya se ha comentado anteriormente, es la zona de carga por goteo. Este tipo de carga sirve para terminar de cargar la batería. El IC aplicado en esta etapa es de C/20, es decir, 0.5A durante media hora.



- La cuarta etapa es la que se encargará de contrarrestar la autodescarga natural de la batería. Se aplicará una corriente con un IC de C/300, es decir, 30mA. Esta última etapa puede llegar a tener una duración máxima de hasta 14 horas. En todo momento se siguen midiendo las señales de corriente, tensión y temperatura para saber si se produce algún fallo a lo largo de todo el proceso de carga.

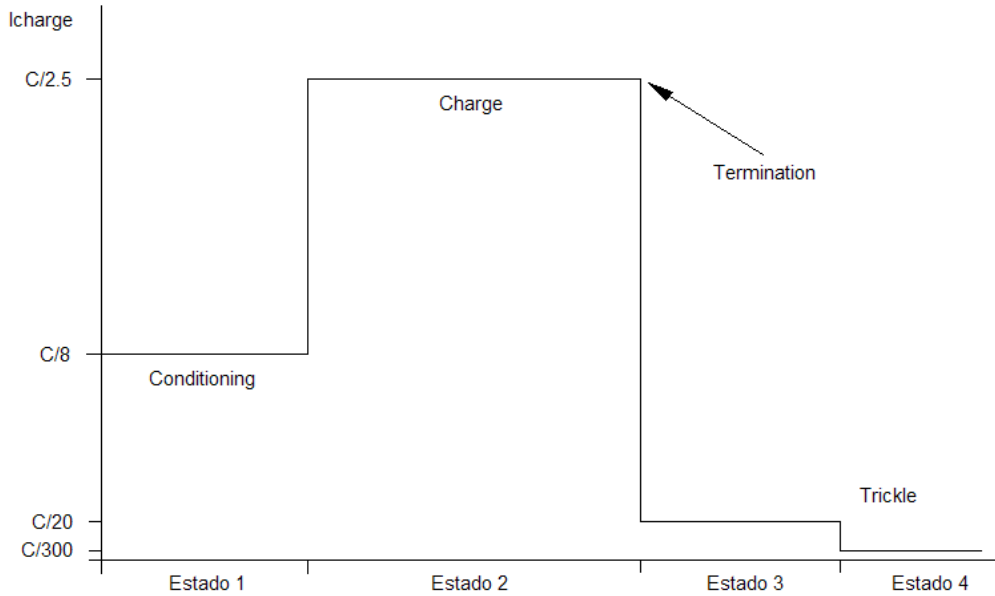


Fig. 3 – Método de carga seleccionado para la batería

### 3.7 - FINALIZACIÓN DE CARGA

Como ya se ha explicado anteriormente, se han aplicado dos formas para detectar que la batería está cargada, el método de  $-\Delta V/\Delta t$  y el método de  $\Delta T/\Delta t$ . Además se ha programado un temporizador que controle que el tiempo en que la batería está conectada no es excesivo. Se programa un tiempo máximo en cada estado y si este tiempo se sobrepasa se indica mediante un diodo led que hay un fallo en la batería.

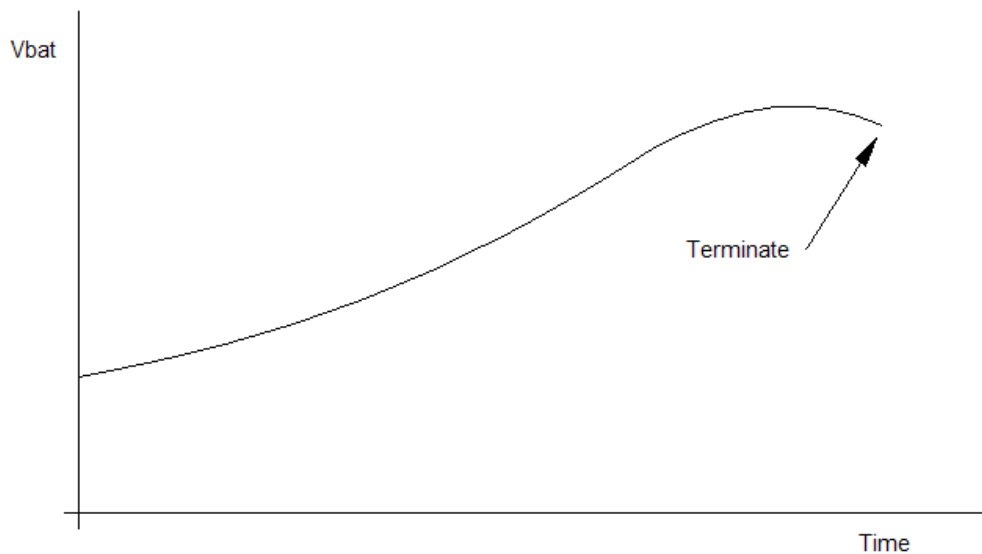


Fig. 4 – Detección de finalización de la carga por  $-\Delta V/\Delta t$

### 3.8 - DISEÑO DE LA ETAPA DE POTENCIA

Una vez explicada la forma de carga que se va a llevar a cabo en las baterías es el momento de diseñar un cargador que sea capaz de cumplir con esas especificaciones.

Para realizar el diseño de la etapa de potencia se han seguido una serie de notas de aplicación de *Power Integrations*, en concreto las que hacen referencia a la familia de dispositivos *TOPSwitch*. Estas notas de aplicación van desde la AN-14 hasta la AN-22 [4]. Estas notas de aplicación guían al diseñador a través de todo el proceso. El único inconveniente es que están pensadas para utilizar un circuito integrado que incorpora el transistor y la etapa de control, por lo tanto llega un punto en el que la metodología de estas hojas pasa a ser inadecuada.

Otro pilar importante a la hora de realizar el desarrollo de la etapa de potencia ha sido una hoja de diseño en Mathcad de la asignatura “Fuentes de alimentación electrónicas” de la Universidad de Zaragoza, impartida por D. Abelardo Martínez [11].

Se ha diseñado una etapa flyback como bloque general de nuestro convertidor. Se decidió utilizar esta topología debido al bajo coste que presenta frente a las demás topologías con aislamiento galvánico, imprescindible por normativa de seguridad eléctrica.

Otros motivos para habernos decantado por este diseño es el valor de potencia que se necesita a la salida del convertidor y el rendimiento que ofrece una etapa de estas características. La Tabla 1 muestra una comparativa de las topologías más utilizadas para fuentes de alimentación. [5]

Topology	Power Range(W)	Vin(dc) Range	In/Out Isolation	Typical Efficiency (%)	Relative Parts Cost
Buck	0-1000	5-40	No	78	1.0
Boost	0-150	5-40	No	80	1.0
Buck-boost	0-150	5-40	No	80	1.0
Forward	0-150	5-500	Yes	78	1.4
Flyback	0-150	5-500	Yes	80	1.2
Push-pull	100-1000	50-1000	Yes	75	2.0
Half-bridge	100-500	50-1000	Yes	75	2.2
Full-bridge	400-2000+	50-1000	Yes	73	2.5

Tabla 1 - Comparación de las etapas reguladas mediante PWM

De todas estas topologías, la favorita entre 100 y 150W es la flyback debido al coste relativamente menor que el resto de las etapas y también por tener un rendimiento mayor.

### 3.9 - MODO DE FUNCIONAMIENTO DE UNA FLYBACK

El convertidor flyback está basado en el convertidor buck-boost. La función básica del inductor es la misma en ambos casos. Los devanados del transformador de la flyback son equivalentes a un solo inductor en el buck-boost. Un devanado se utiliza mientras que el transistor conduce, mientras que el otro devanado se utiliza cuando el diodo de salida conduce.

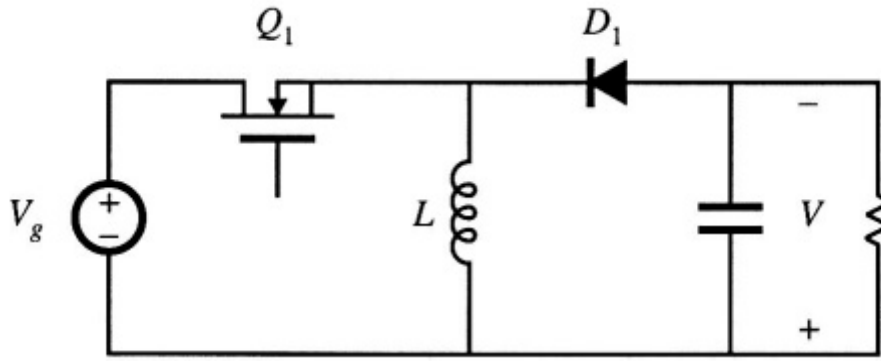


Fig. 5 - Convertidor buck-boost [12]

La corriente total en los dos devanados del transformador es igual a la de la bobina del circuito buck-boost. Sin embargo, en el transformador la corriente se distribuye entre los bobinados alternativamente.

A diferencia de los transformadores convencionales, la corriente no fluye en los dos devanados simultáneamente. Las marcas de la polaridad de los devanados están intercambiadas como se puede ver en la Fig. 6 para obtener una tensión positiva a la salida de la etapa. [12]

### 3.10 - METODOLOGÍA DE DISEÑO

Diseñar una fuente conmutada conlleva tener en cuenta una serie de aspectos relacionados con circuitos analógicos, digitales, inductancias magnetizantes, dispositivos bipolares y MOSFET, consideraciones térmicas, cumplir una serie de requisitos mínimos de seguridad eléctrica etc. Hacer que todos estos aspectos terminen combinando correctamente es una tarea que puede resultar bastante complicada si no hay una pequeña guía que defina los pasos a seguir para cada bloque.

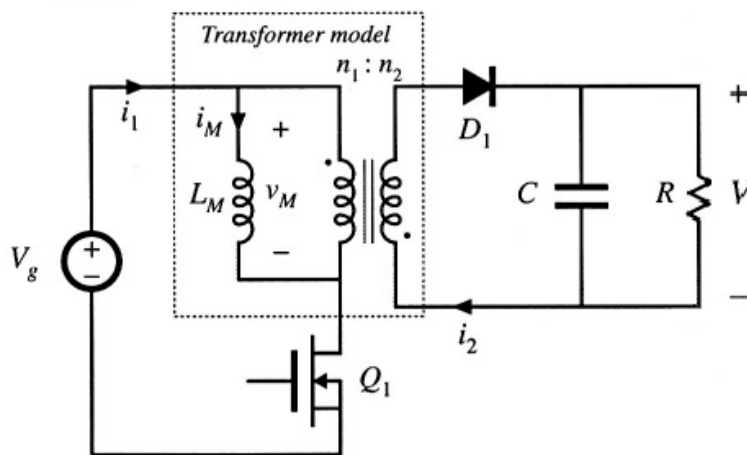


Fig. 6 – Esquema básico de la etapa Flyback [12]

Hay que seguir un proceso iterativo con multitud de ajustes para que todo el diseño termine de encajar. El diseño básico envuelve los componentes básicos de la flyback para más tarde pasar a introducir el resto de componentes que servirán de apoyo para que ésta funcione correctamente. Estos componentes adicionales son el circuito de clamp, el circuito de snubber, el circuito de bias, el circuito de arranque etc.

Las especificaciones iniciales que hemos aplicado a este diseño son:

Magnitud	Valor	Unidades
Tensión de entrada	230	V
Frecuencia de entrada	50	Hz
Tensión de salida	34	V
Corriente de salida	4	A
Frecuencia de conmutación	100	kHz
Tensión del circuito de bias	15	V

**Tabla 2 – Especificaciones iniciales de la flyback**

Modo de funcionamiento:

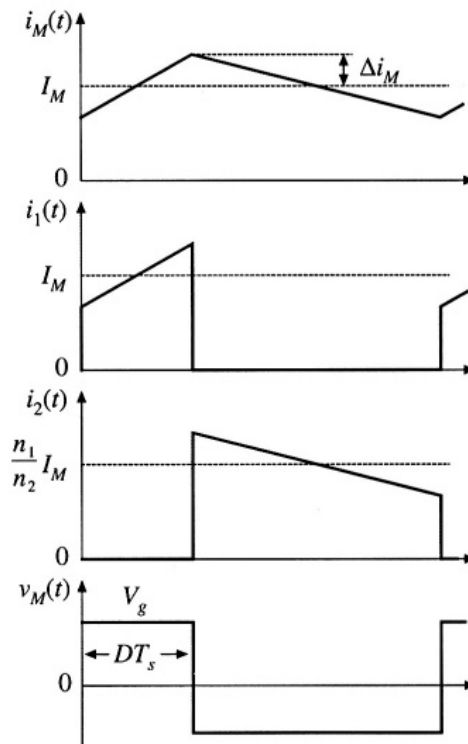
A la hora de diseñar una fuente conmutada hay que tener en cuenta el modo de funcionamiento que ésta va a tener.

Hay dos modos de funcionamiento posibles: [12]

- Modo continuo (CCM): La característica principal es que en todo momento hay corriente atravesando algún devanado del transformador. Los dos estados de funcionamiento que podemos encontrar son los siguientes.

○Estado 1, donde el transistor  $Q_1$  está en ON y el diodo de salida  $D_1$  está en corte. Durante este periodo de tiempo se almacena energía por el primario del transformador en la inductancia magnetizante  $L_M$ , la cual se representa en la Fig. 6.

○Estado 2. El transistor queda en corte y el diodo entra a conducir. La energía que en el estado 1 se ha almacenado en el transformador se transfiere al secundario y se induce la corriente que carga la batería.



**Fig. 7 – Formas de onda en modo CCM para etapa flyback [12]**

En la Fig. 7 se puede apreciar que la corriente por el transformador no es nula en ningún momento. La corriente por el secundario es el valor de la corriente por la inductancia magnetizante  $L_M$  del primario multiplicada por la relación de transformación  $n1/n2$ .

- Modo discontinuo (DCM): En este otro modo de funcionamiento hay tres estados de funcionamiento como se puede comprobar en la Fig. 8. El estado 1 y el estado 2 (D1 y D2) son exactamente iguales que en el modo de conducción continuo pero llega un momento en el que la corriente por el secundario se hace cero y hay un periodo de tiempo, que llamaremos estado 3 (D3), en el que no hay circulación de corriente por ninguno de los devanados del transformador.

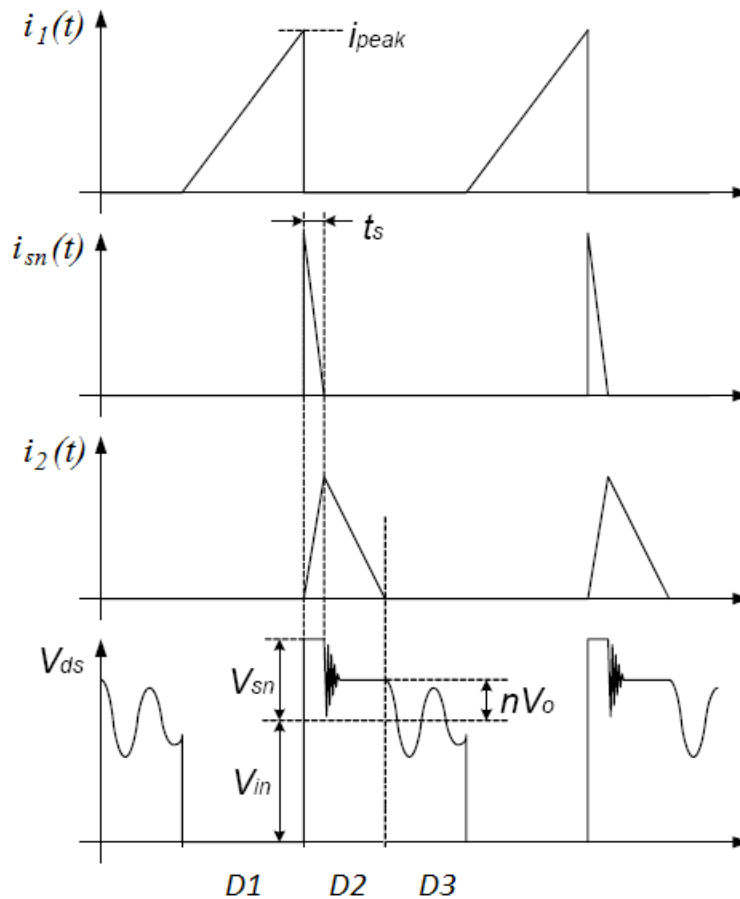


Fig. 8 – Formas de onda en modo DCM para etapa flyback [13]

El modo de funcionamiento de la fuente viene definido por el ciclo de servicio máximo  $D$  del transistor. Este ciclo de servicio se calcula con parámetros de tensión de entrada, salida y la tensión máxima que es capaz de soportar nuestro transistor.

En nuestro caso, se ha diseñado la fuente para obtener un ciclo de servicio menor de 0.5 con las condiciones más desfavorables, por lo que la fuente estará funcionando en modo DCM.



Todo el proceso de diseño se puede encontrar de manera más detallada en el anexo I.

Mención aparte merece el circuito de arranque de la flyback. La razón para haber instalado este circuito de arranque es la siguiente. El sistema de control con el microcontrolador está conectado eléctricamente al secundario del transformador. Este bloque se alimenta directamente de la batería a través de un regulador de 3.3 V.

Una vez que el microcontrolador haya detectado que puede empezar a cargar la batería activará la señal de salida que sea capaz de disparar el transistor.

Para poder disparar el transistor se necesita poner un circuito de driver que sea capaz de entregar al transistor una tensión y corriente necesarias para su correcto funcionamiento. Este circuito está alimentado desde un devanado auxiliar del transformador, que sólo será capaz de entregar potencia cuando el transistor de la flyback esté conmutando. El driver utilizado es un optoacoplador TLP250 como se puede ver en el esquema general de nuestro cargador en la Fig. 9.

Como inicialmente no tenemos el driver alimentado, éste está recibiendo la señal de disparo optoacoplada pero no es capaz de disparar el transistor por lo que no generaremos tensión en el circuito de alimentación del propio driver.

Esta es la razón de la necesidad de un circuito de arranque. Una vez que el circuito de alimentación auxiliar tenga una tensión suficiente, el circuito de arranque dejará de funcionar.

### ***3.11 - ACONDICIONAMIENTO DE LOS SENSORES***

Los circuitos de acondicionamiento de los sensores adecúan las magnitudes medidas al rango del convertidor A/D del microcontrolador.

Por un lado tenemos una sonda NTC para poder medir la temperatura con una combinación de resistencias que linealizan su comportamiento según el método propuesto en [14].

El circuito para medir la tensión de la batería consta de un divisor de tensión que obtendrá una tensión de 2.5 V en la entrada del microcontrolador para la tensión máxima de la batería.

Por último, para medir la corriente de carga se ha utilizado una resistencia shunt de 10mΩ juntos con un amplificador diferencial (INA194) que monitoriza esta corriente y a su salida entrega una tensión proporcional a la corriente medida. Éste será el valor digitalizado en el microcontrolador.

### ***3.12 - DISEÑO DE LA ETAPA DE CONTROL***

El bloque correspondiente al control está formado por un microcontrolador de la familia MSP430 de Texas Instruments y varios sensores. En el microcontrolador se hace uso del convertidor analógico-digital para leer la información proporcionada por estos sensores y de un temporizador para producir la señal PWM de disparo del transistor. Considerando la necesidad de generar señal PWM de 100 kHz con suficiente resolución, se ha seleccionado un microcontrolador que dispusiera de un temporizador de alta resolución (Timer D en la familia MSP430). Esto permite mantener la frecuencia de reloj baja puesto que el algoritmo de control no tiene requisitos de velocidad elevados. Con estos condicionantes, el microcontrolador elegido fue el MSP430F5152 que incluye convertidor A/D de 10 bits y una UART que se podrá utilizar para transmitir las medidas de los sensores a un ordenador en desarrollos futuros.

A partir de la información de los sensores se determina cuales son las acciones a realizar para cargar la batería. El temporizador se configura para funcionar como control PWM que varíe según la corriente que queremos que atraviese a la batería.

Para la programación del microcontrolador se ha utilizado un depurador y un emulador con conexión JTAG. Concretamente se ha utilizado el MSP-FET430UIF. Se ha utilizado la comunicación JTAG con 4 hilos como se puede ver en el documento Hardware Tools de Texas Instruments. [15]

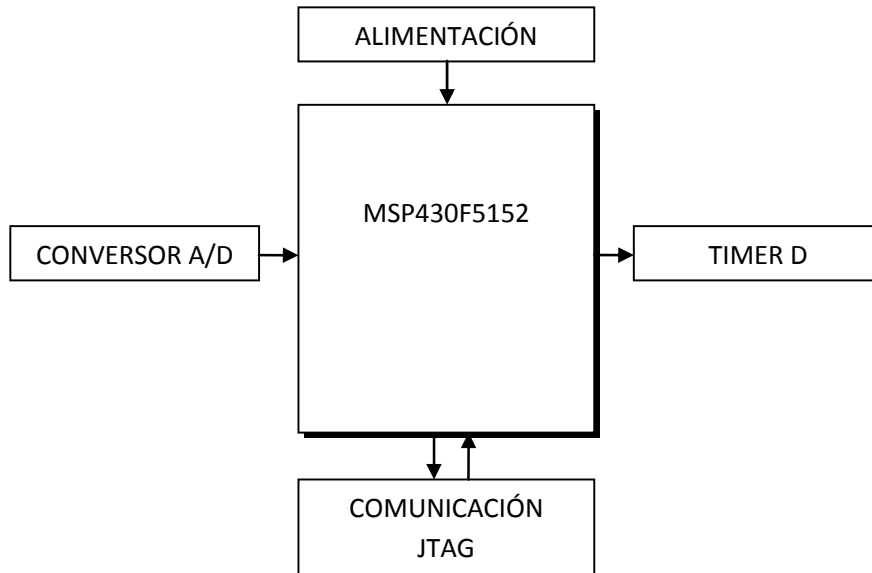


Fig. 10 – Diagrama del circuito con microcontrolador

### 3.13 - FIRMWARE

El usuario del cargador no tiene ningún tipo de acceso al control de la batería. El cargador proporciona información al usuario mediante dos diodos led que se iluminan en momentos clave de la carga.

En los anexos se puede encontrar el manual de usuario para obtener información acerca del modo de funcionamiento.

El objetivo del firmware diseñado es hacer pasar a la batería por los cuatro estados de carga que se han definido en apartados anteriores. Para realizar esta tarea se hace una medida inicial de las tres magnitudes a través del conversor A/D.

Con el valor de tensión obtenido nos colocamos en el estado de carga correspondiente. Si la tensión es demasiado baja o demasiado alta se indica que hay un fallo en la batería y el proceso de carga no se inicia.

La temperatura de la batería nos permite saber si se encuentra en las condiciones ambientales adecuadas para ser cargada. Si la temperatura es demasiado elevada la carga no se iniciará.

Una vez dentro del ejecutivo cíclico se toman diez medidas de corriente por segundo para sacar posteriormente la media aritmética. Estas diez medidas están repartidas en un tiempo de 10 ms para ajustarse a un semiperiodo de la tensión de red. Gracias al promedio de los valores



recogidos también se disminuye el ruido que puedan haber recogido las señales de forma puntual.

Cada minuto se toman medidas de tensión y temperatura para poder saber si la batería necesita cambiar de estado o si ha sufrido algún tipo de fallo.

Los diagramas de bloques correspondientes al programa y el código introducido en el microcontrolador se encuentran disponibles en anexos.



CAPÍTULO 4 SIMULACIONES Y RESULTADOS EXPERIMENTALES

#### 4.1 - SIMULACIONES

En este capítulo se exponen las simulaciones que verifican que, a priori, se cumplen los objetivos de diseño marcados. Las simulaciones se han realizado únicamente de la parte correspondiente a la etapa de potencia como ya se ha comentado en el resumen del proyecto.

La batería se ha modelizado como una batería ideal con una resistencia interna. Cada celda tiene una resistencia interna aproximada de  $50 \text{ m}\Omega$  por lo que, al tener 20 celdas, tenemos una resistencia total de  $1 \Omega$ .

El transistor se modela como un interruptor con una resistencia interna de  $0.25 \Omega$  y un condensador en paralelo de  $300 \text{ pF}$ . Estos valores han sido sacados del datasheet del transistor [16]. El disparo del mismo se ha realizado con un generador de onda cuadrada con un tiempo de paso a on y de paso a off de  $100 \text{ ns}$ . Este generador trabaja a una frecuencia de  $100 \text{ kHz}$  y un tiempo de ciclo D variable.

Otro de los valores importantes a introducir en la simulación es la inductancia de fuga del transformador, ya que la energía almacenada en ella es la que se va a tener que disipar en el circuito de clamp. Como primera aproximación, el valor de esta  $L_{\text{leak}}$  es 0.2 veces la inductancia del primario. [12]

Los valores introducidos en la simulación son los siguientes:

Nombre	Valor	Unidades
<b>D</b>	Variable	
<b>k</b>	0.98	
<b>V<sub>bat</sub></b>	Variable	V
<b>R<sub>bat</sub></b>	1	$\Omega$
<b>C<sub>x</sub></b>	0.47	$\mu\text{F}$
<b>R<sub>x</sub></b>	220	$\text{M}\Omega$
<b>Puente rectificador</b>		
<b>C<sub>rectificador</sub></b>	150	$\mu\text{F}$
<b>C<sub>mkp</sub></b>	0.22	$\mu\text{F}$
<b>R<sub>clamp</sub></b>	15000	$\text{k}\Omega$
<b>C<sub>clamp</sub></b>	1	$\text{nF}$
<b>D<sub>clamp</sub></b>	Rs = 1	$\text{m}\Omega$
<b>R<sub>snober</sub></b>	1	$\text{k}\Omega$
<b>C<sub>snober</sub></b>	0.47	$\text{nF}$
<b>D<sub>snober</sub></b>	Rs = 1	$\text{m}\Omega$

$R_{mos}$	0.25	$\Omega$
$C_{mos}$	300	pF
<b>Transistor NMOS</b>		Interruptor ideal
$R_{tx1}$	0.4	$\Omega$
$L_{tx1}$	198	$\mu H$
$L_{tx2}$	15.8	$\mu H$
$L_{tx3\_bias}$	4	$\mu H$
$L_{leak}$	$L_{tx1}*(1-k)$	$\mu H$
$C_{bias}$	15	$\mu F$
$R_{bias}$	1	k $\Omega$
$D_{bias}$	$R_s = 1$	m $\Omega$
$C_{out1}$	1000	$\mu F$
$C_{out2}$	1000	$\mu F$
$D_{out}$	$R_s = 1$	m $\Omega$
$V_{disparo\_mos}$	PWM=D/100kHz	f=1/100kHz
$V_{in}$	230	Vac
$R_{gnd1}$	1	M $\Omega$
$R_{gnd2}$	1	M $\Omega$

**Tabla 3 – Componentes y valores para la simulación en PSpice**

Se realizaron simulaciones en los valores límite de cada estado para obtener unos tiempos de ciclo aproximados y para asegurar que el diseño del circuito de clamp era el correcto, ya que este conjunto de componentes son fundamentales para la seguridad del transistor.

El código empleado para realizar la simulación se puede encontrar en el Anexo IV.

## 4.2 - RESULTADOS OBTENIDOS

### ESTADO 1

#### Simulación 1.1:

En esta primera etapa de la carga queremos tener un índice de carga de C/8.

Si la tensión detectada es menor de 10 V el microcontrolador dará una señal de alarma y la carga no se iniciará debido a que es una tensión demasiado reducida como para que la batería se encuentre en buen estado.

Datos	Valor
$V_{bat}$	10 V
$I_{bat}$	1.25 A
D	0.07

Tabla 4 – Simulación 1.1

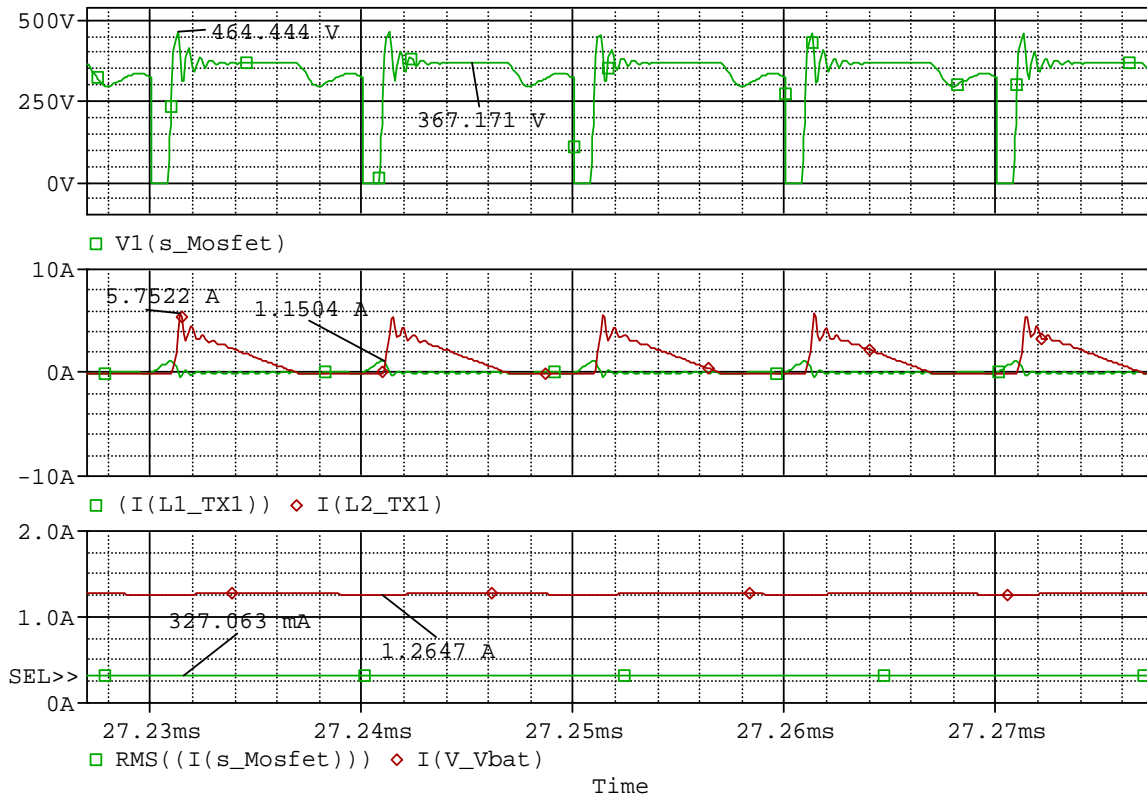


Fig. 11 – Estado 1, simulación 1.1

Un cálculo sencillo para averiguar cuál es la tensión que soporta el transistor en estado off es sumar la tensión reflejada del secundario al primario más la tensión del primario.

Simulación 1.2:

El estado 1 llega hasta una tensión aproximada de 19 V, una vez llegados a este punto pasaremos al estado 2. La modificación del tiempo de ciclo que se produzca durante el cambio de estado será de la misma magnitud que la variación que éste pueda sufrir estando en mitad de un estado. Una variación de tiempo de ciclo brusca producirá un pico de corriente que puede dañar los componentes del cargador.

Datos	Valor
$V_{bat}$	19 V
$I_{bat}$	1.25 A
D	0.097

Tabla 5 – Simulación 1.2

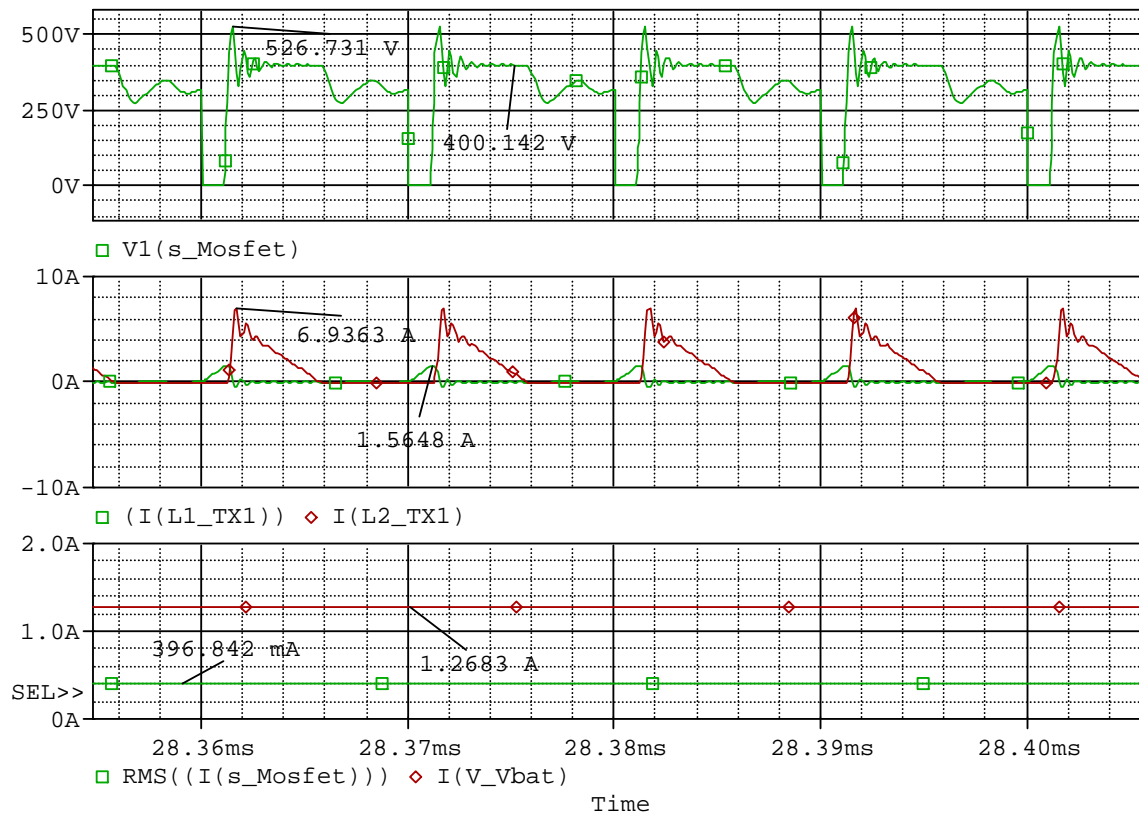


Fig. 12 – Estado 1, simulación 1.2

## ESTADO 2

### Simulación 2.1:

Una vez en el estado 2 pasamos a entregar a la carga una corriente de 4 A, es decir, se carga la batería con un índice de carga de  $C/2.5$ .

Datos	Valor
$V_{bat}$	19 V
$I_{bat}$	4 A
D	0.215

Tabla 6 – Simulación 2.1

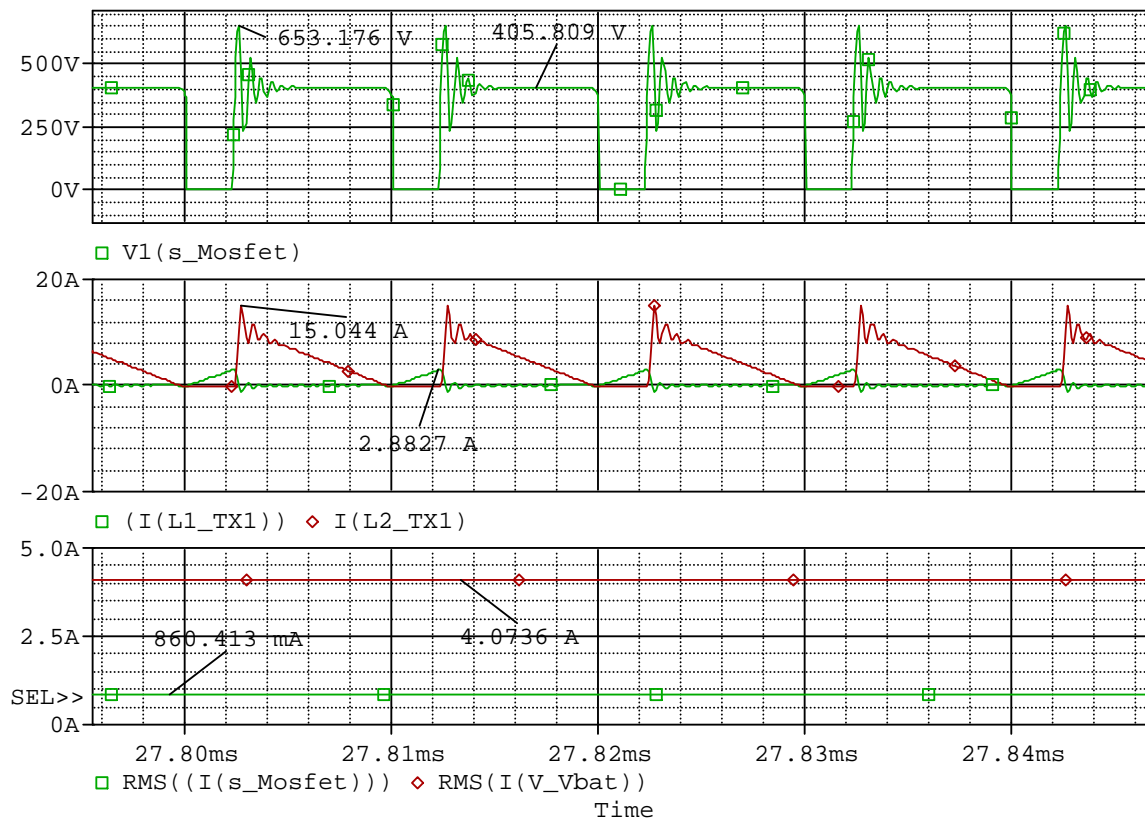


Fig. 13 – Estado 2, simulación 2.1



### Simulación 2.2:

En realidad el límite del estado 2 viene impuesto por el método de detección de carga que detecte primero que la batería se ha cargado.

Como límite del estado 2 se ha considerado una tensión 1.3 veces la tensión nominal de las baterías.

Suponemos que el estado 2 terminará con una tensión de 32 V.

Datos	Valor
$V_{bat}$	32 V
$I_{bat}$	4 A
D	0.285

Tabla 7 – Simulación 2.2

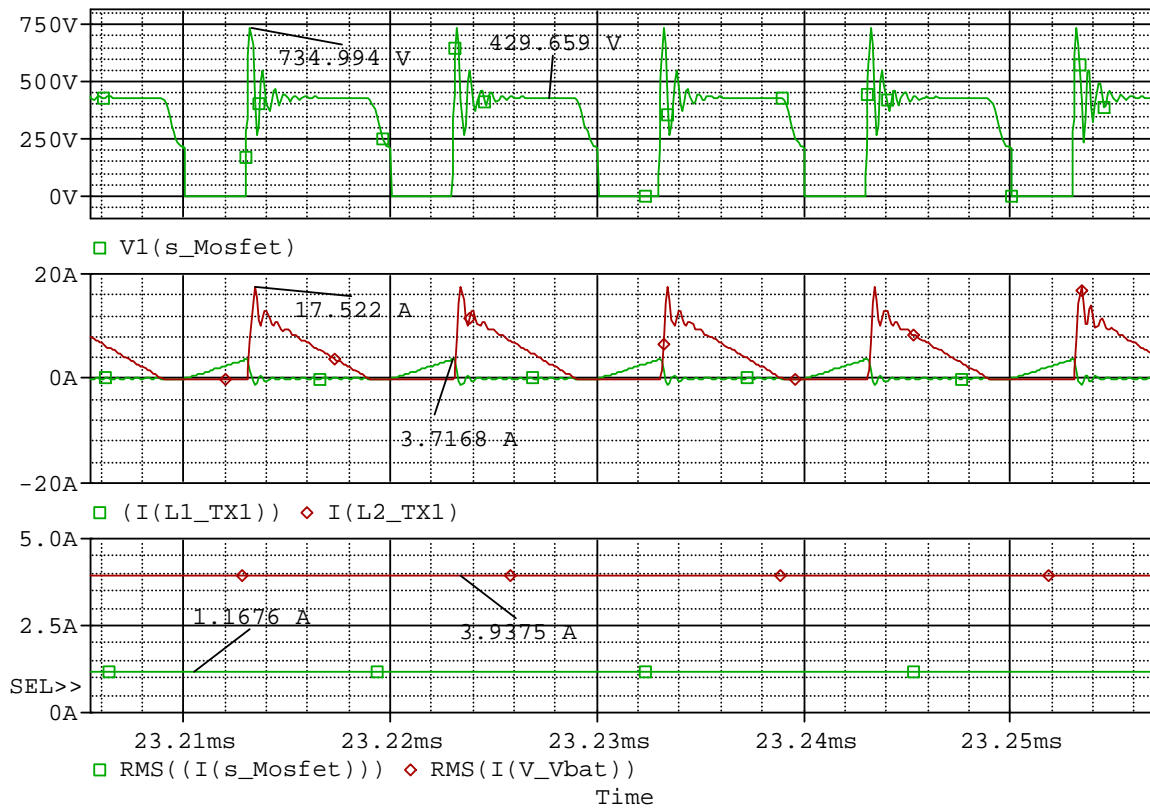


Fig. 14 – Estado 2, simulación 2.2

### ESTADO 3

En el estado 3 pasamos a entregar una corriente de 0.5 A para terminar de cargar la batería.

Simulación 3.1:

Datos	Valor
$V_{bat}$	32 V
$I_{bat}$	0.5 A
D	0.08

Tabla 8 – Simulación 3.1

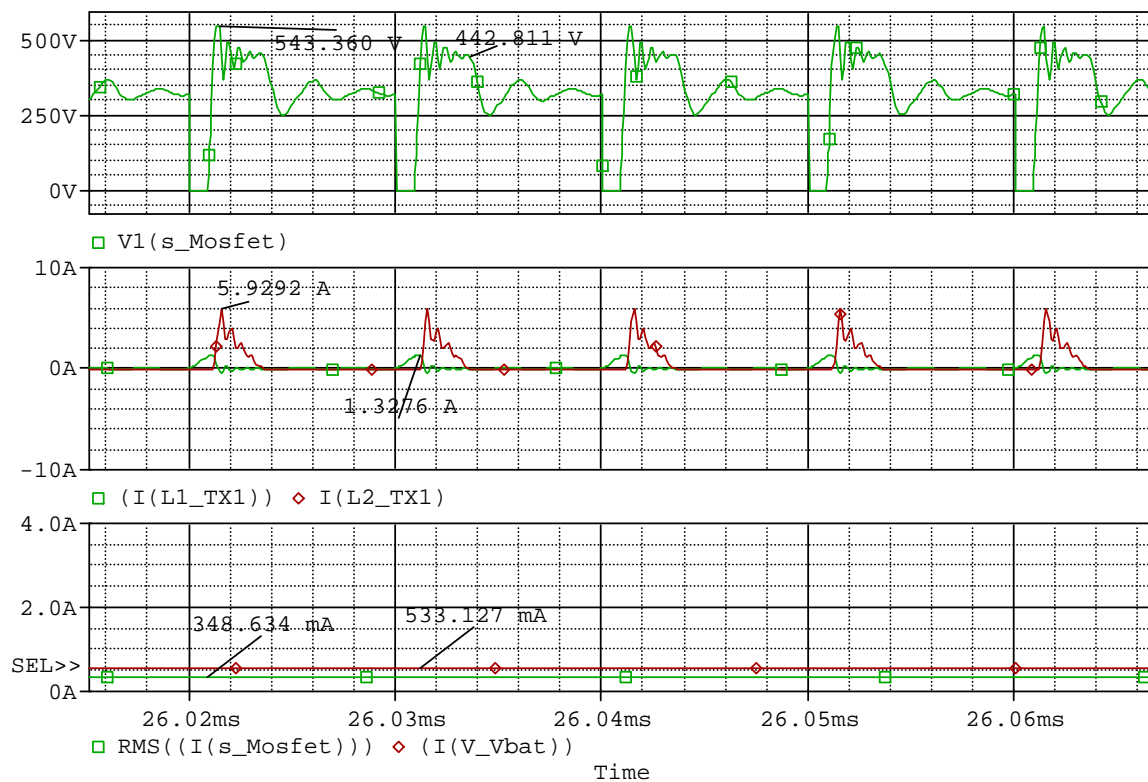


Fig. 15 – Estado 3, simulación 3.1

### Simulación 3.2:

Como límite superior para cargar la batería ponemos una tensión de 34V, es decir, se aplicará corriente con un índice de carga de C/20 durante media hora, pero si esta tensión alcanza un valor de 34 V se pasará directamente al estado 4 para no dañar la batería.

Datos	Valor
$V_{bat}$	34 V
$I_{bat}$	0.5 A
D	0.08

Tabla 9 – Simulación 3.2

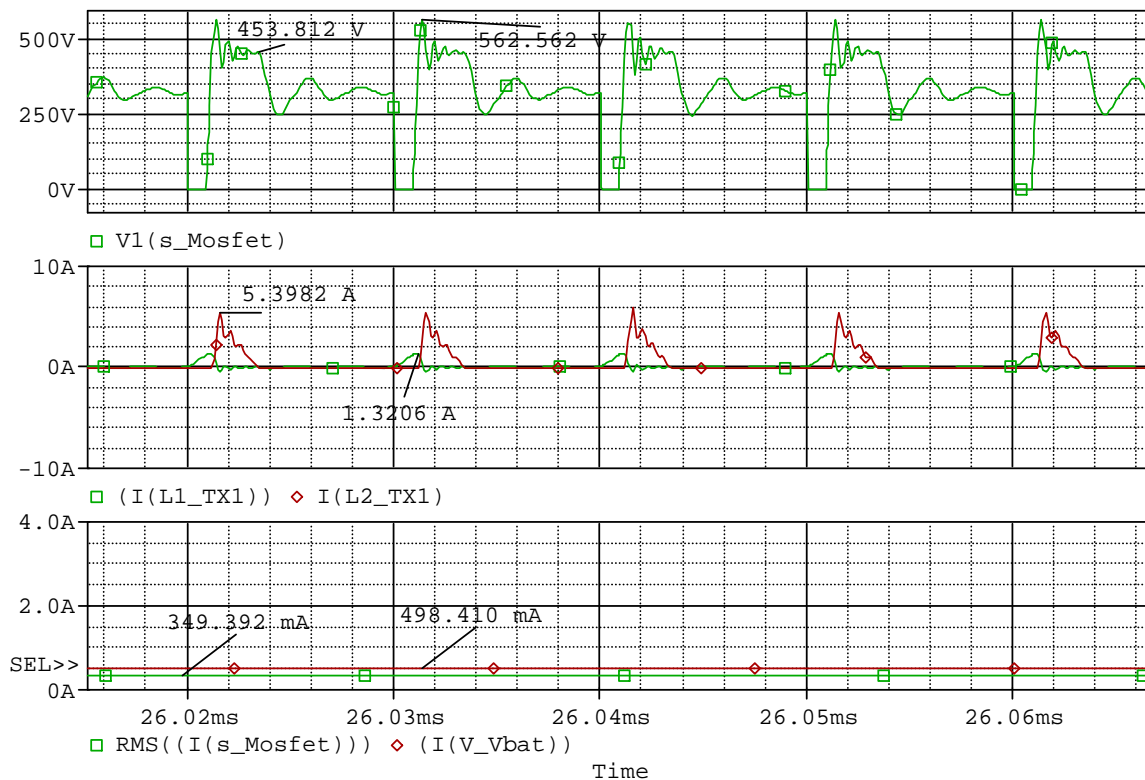


Fig. 16 – Estado 3, simulación 3.2

### ESTADO 4

Este último estado sirve para contrarrestar la autodescarga de la propia batería. En este estado hay un límite de tiempo de 14 horas, aunque la batería podría estar conectada de forma indefinida.

El índice de carga aplicado en este estado es de C/300.

Suponemos que la tensión de la batería en el estado 4 puede variar en el mismo margen de tensiones que en el estado 3.

Simulación 4.1:

Datos	Valor
$V_{bat}$	32 V
$I_{bat}$	0.03 A
D	0.01

Tabla 10 – Simulación 4.1

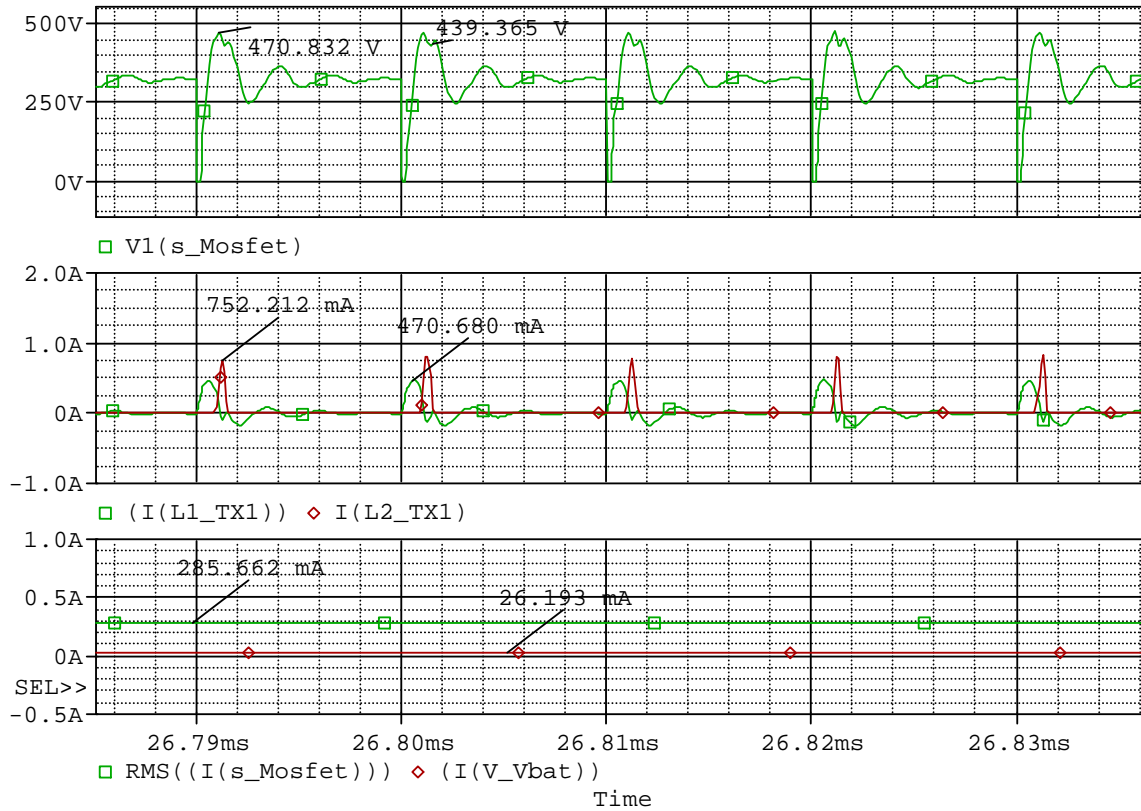


Fig. 17 – Estado 4, simulación 4.1

Simulación 4.2:

Datos	Valor
$V_{bat}$	34 V
$I_{bat}$	0.03 A
D	0.015

Tabla 11 – Simulación 4.2

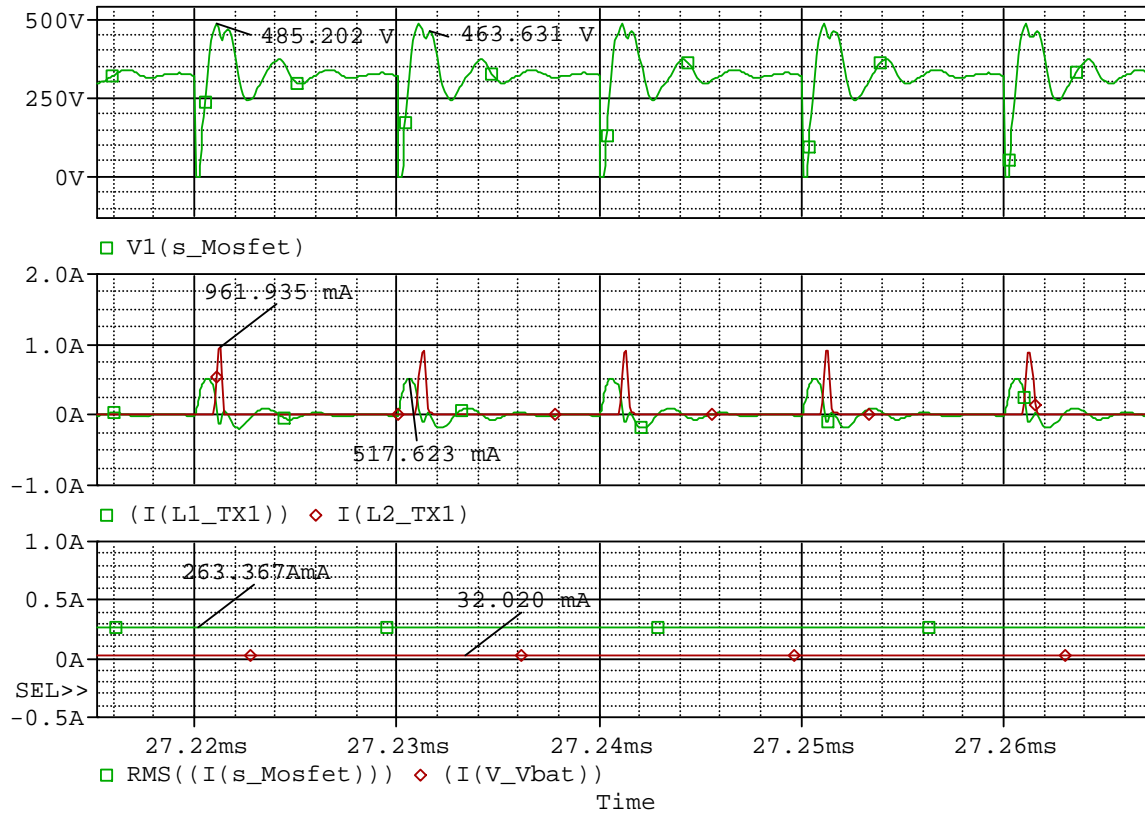


Fig. 18 – Estado 4, simulación 4.2

En las siguientes imágenes podemos observar cómo serían las tensiones y corrientes por nuestra etapa poniendo o quitando el circuito de clamp y el de snubber.

Las simulaciones se han realizado en las mismas condiciones que en la simulación 2.2, ya que han sido las más desfavorables para el cargador.

Simulación 5: Circuito sin snubber ni clamp

Datos	Valor
$V_{bat}$	32 V
$I_{bat}$	4.1343 A
D	0.285

Tabla 12 – Circuito sin snubber ni clamp

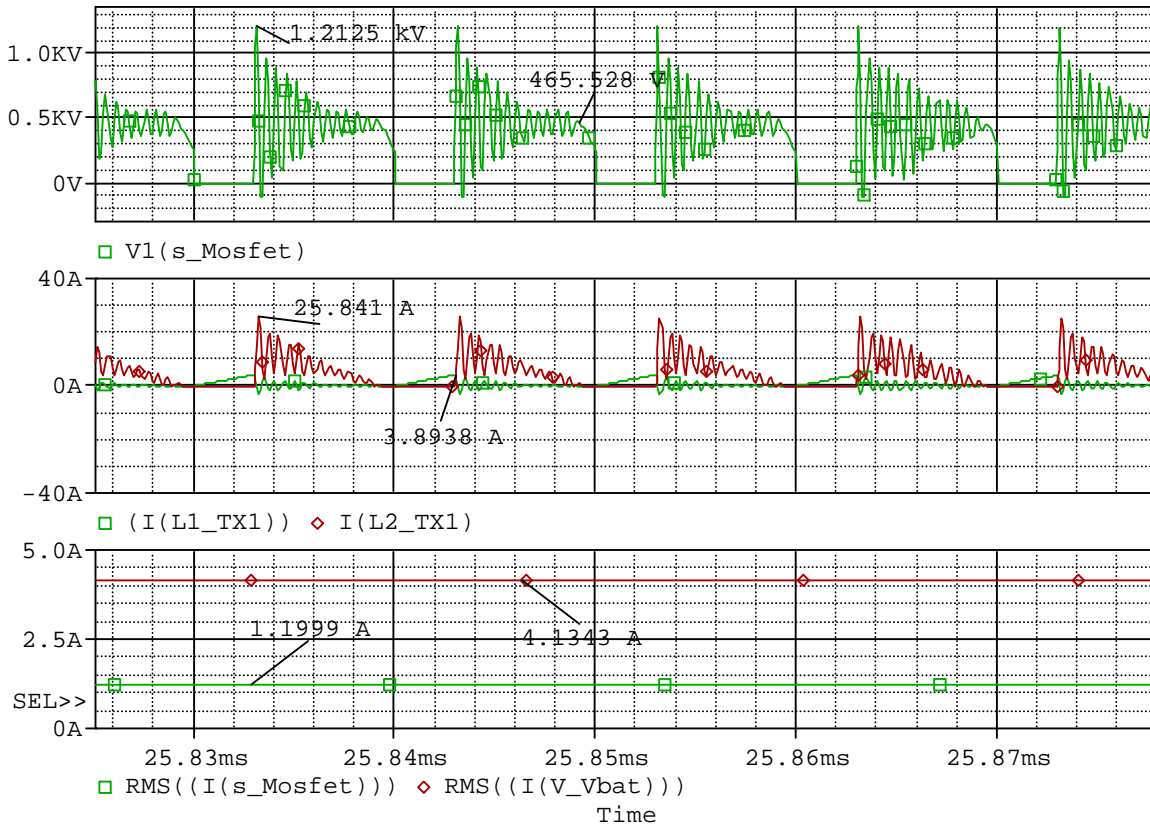


Fig. 19 – Circuito sin clamp ni snubber paso a off

En esta primera simulación sin ninguna limitación vemos que las sobreoscilaciones no están atenuadas. Se producen unos picos de tensión que alcanzan los 1.2 kV, valor que sería capaz de destruir el transistor, ya que este solamente aguanta 800 V entre drenador y fuente.

Simulación 6: Circuito con clamp

Datos	Valor
$V_{bat}$	32 V
$I_{bat}$	4 A
D	0.285

Tabla 13 – Circuito con clamp

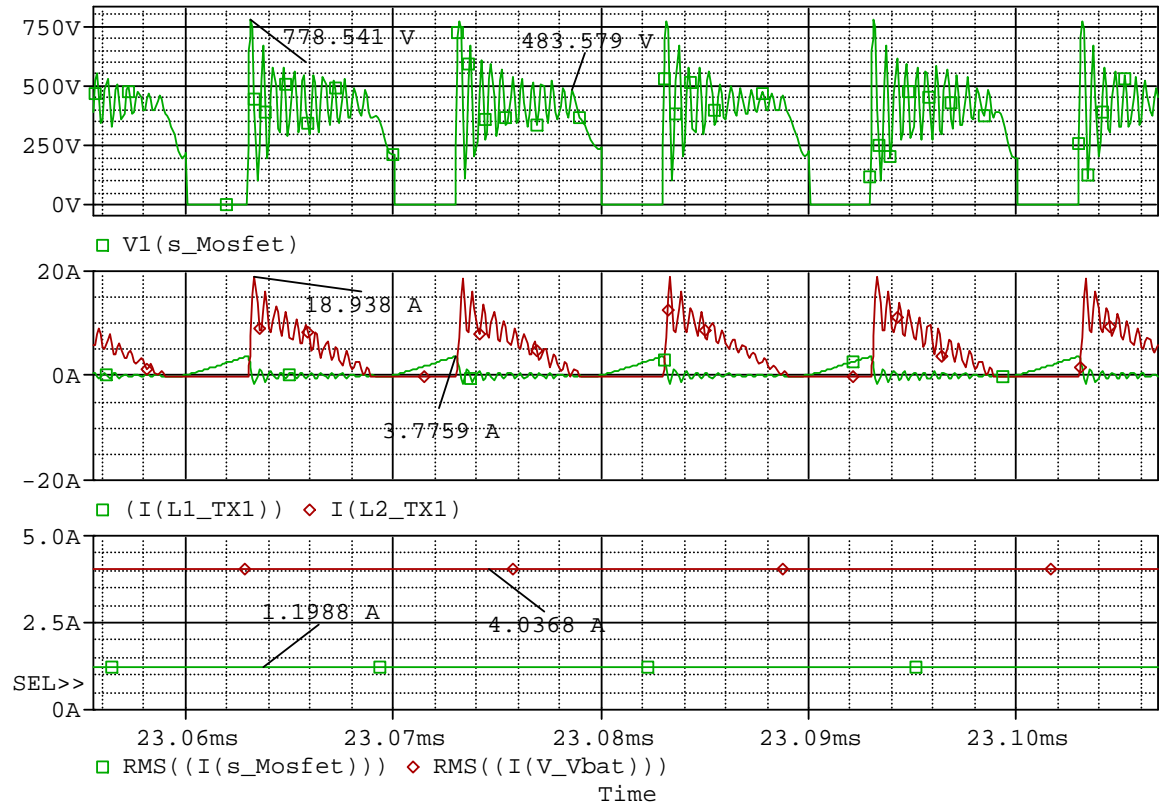


Fig. 20 – Etapa con circuito de clamp

Simulación 7: Circuito de snubber de paso a off

Datos	Valor
$V_{bat}$	32 V
$I_{bat}$	4 A
D	0.285

Tabla 14 – Circuito con snubber de paso a off

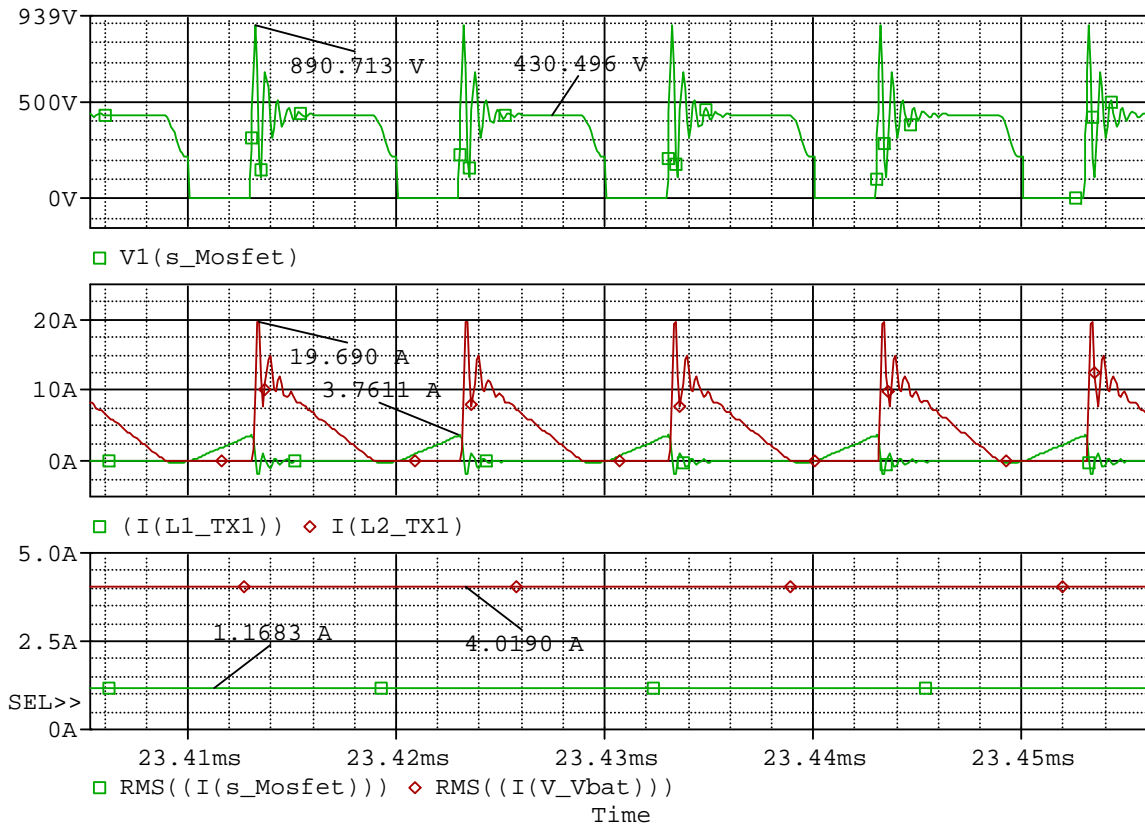


Fig. 21 – Etapa con snubber paso a off

Por último, solamente con el circuito de snubber instalado se obtiene un pico de sobretensión que supera los 800 V, por lo que el transistor sufriría daños irreparables, pero por otra parte, podemos ver como la onda se ha estabilizado mucho antes.



Simulación 8: Formas de onda del diodo de salida

Datos	Valor
$V_{bat}$	32 V
$I_{bat}$	4 A
D	0.285

Tabla 15 – Formas de onda diodo de salida

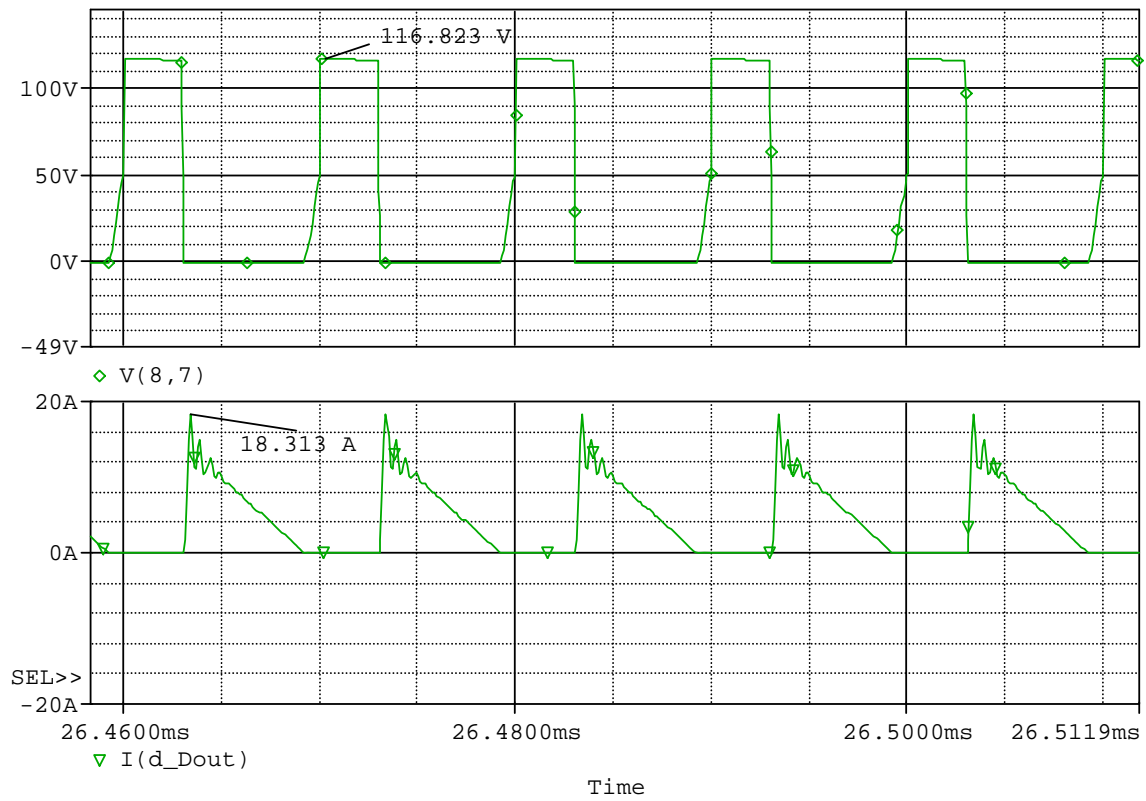


Fig. 22 – Formas de onda del diodo de salida

#### ***4.3 - CONCLUSIONES OBTENIDAS A PARTIR DEL ESTUDIO DE LAS SIMULACIONES.***

Como se puede observar, la tensión a la que está sometido el transistor tiene un valor máximo en las peores condiciones de 750 V. Este resultado confirma el diseño satisfactorio del circuito de clamp. Tal y como se ha justificado en la Fig. 20.

La introducción de un circuito de snubber de paso a off, aunque en principio no sea obligatoria, favorece en gran medida a mejorar las formas de onda tanto de tensión como de corriente.

El cargador es capaz de proporcionar la corriente deseada a la batería en cualquiera de los estados en los que se encuentre.

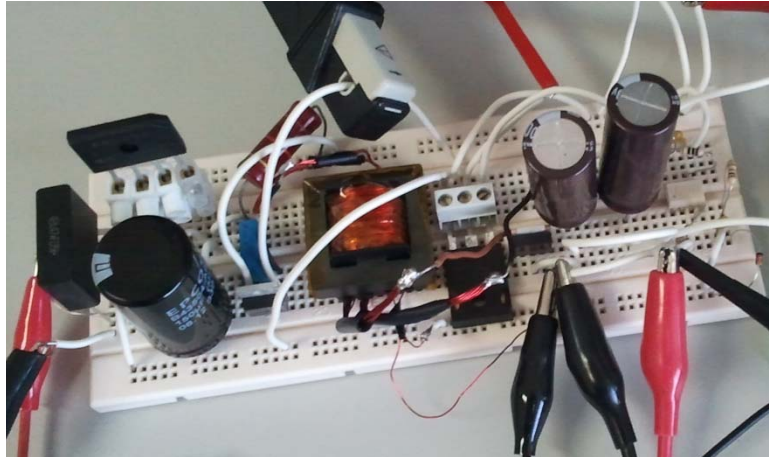
La corriente de pico que atraviesa el devanado primario del transformador se encuentra dentro de los márgenes de diseño para los que ha sido dimensionado.

Las formas de onda de tensión y de corriente están dentro del rango de funcionamiento del diodo de salida, ya que ha sido dimensionado para soportar 200V y 32A.

#### **4.4 - MEDIDAS EXPERIMENTALES**

Una vez confirmado el diseño mediante simulación, se pasó a construir el cargador.

Como primer prototipo se construyó el cargador en una placa protoboard.



**Fig. 23 – Montaje del cargador el protoboard**

Una vez validado el circuito de potencia, se pasó al diseño del PCB.

Los equipos utilizados en el laboratorio son los siguientes:

- Osciloscopio digital Tektronix TDS 714L
- Sonda de corriente Tektronix TCP202
- Sonda de tensión diferencial Yokogawa 700924
- Generador de señal Tektronix AFG 3022
- Resistencia CGS HSC100
- Fuente de alimentación programable AC/DC GWINSTEK APS-1102



**Fig. 24 – Bancada de ensayos**

Con la fuente funcionando a tensión de red se obtuvieron diferentes formas de onda para varios de los estados de carga de la batería.

En la siguiente figura podemos ver formas de onda correspondientes a la corriente por el transistor, la tensión drenador – fuente del transistor y la señal del driver de disparo funcionando con un tiempo de ciclo del 20%.

Esta captura de pantalla corresponde con una corriente de salida de 4 amperios y una tensión de salida de 32 V. Éste es el estado de corriente y tensi3ne más desfavorable en el que se puede encontrar el cargador durante todo el proceso de carga.

La corriente de pico del primario coincide con el valor obtenido en el diseño teórico. El circuito de clamp está cortando la onda de tensión del transistor alrededor de los 600 V, dejando un amplio margen de seguridad para el transistor.

Podemos comprobar, con la bajada de tensión al final de  $t_{off}$ , cómo la flyback entra en modo discontinuo.

El circuito de snubber de paso a off atenúa las sobreoscilaciones de forma satisfactoria.

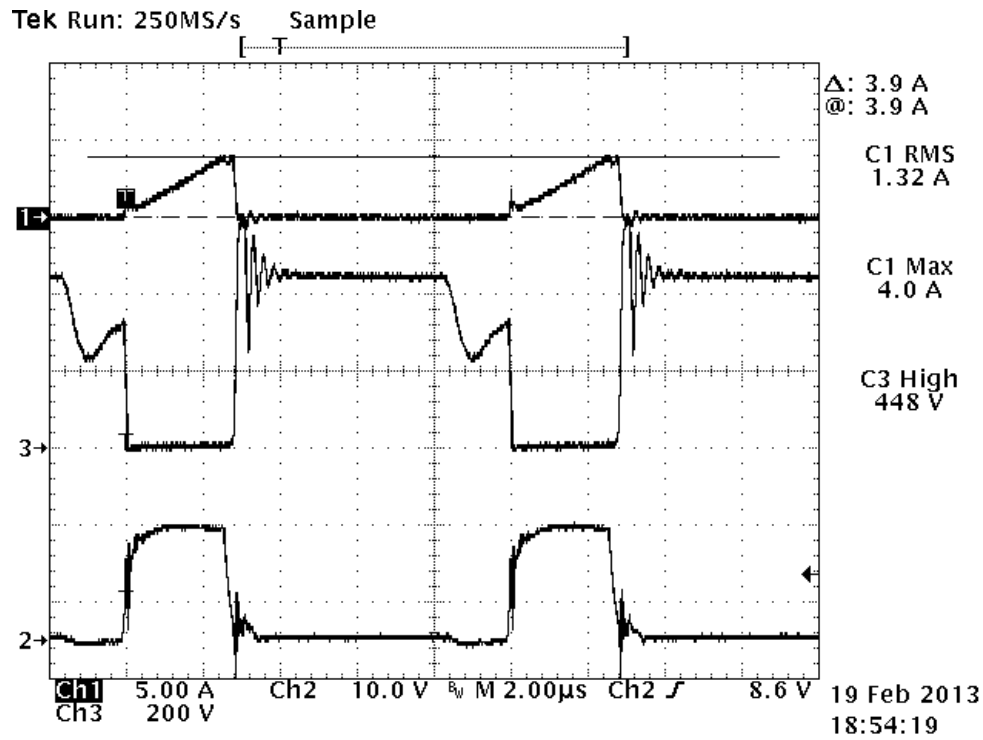


Fig. 25 – Señales de corriente y tensión del transistor con  $I_o = 4$  A  $V_o = 32$  V

A continuación se tomó otra medida para verificar que la corriente de salida era del valor esperado de 4 A.

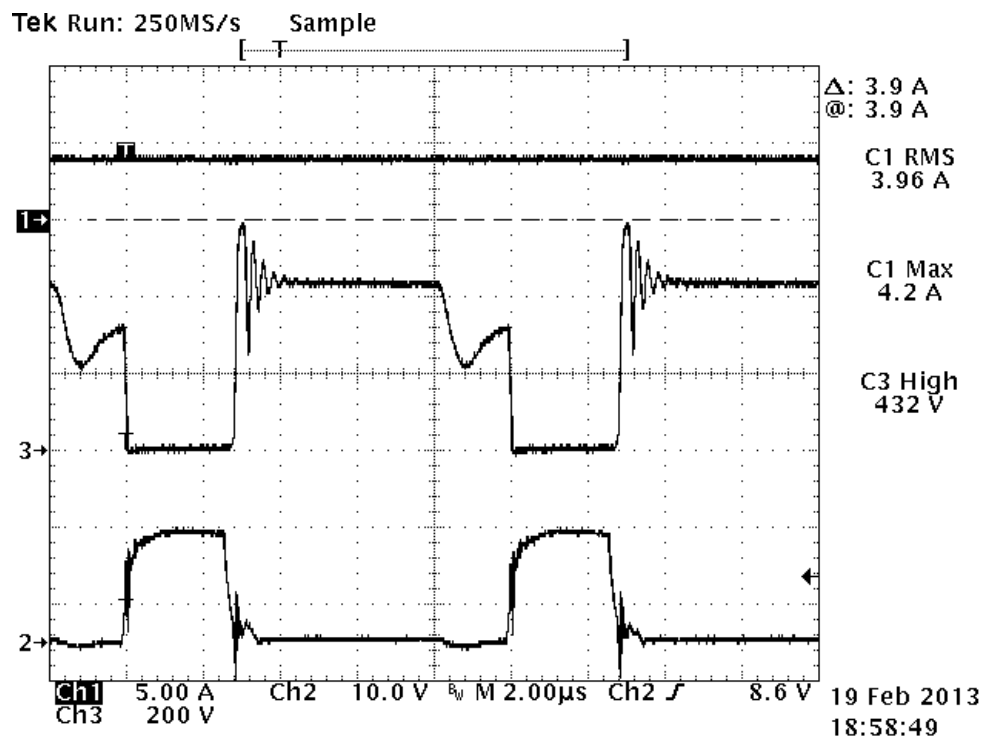


Fig. 26 – Tensión del transistor, corriente de salida  $I_o = 4$  A

La corriente a través del diodo de salida no es posible mostrarla en el osciloscopio ya que no es accesible con la sonda de corriente, pero lo que sí que podemos medir es la tensión que éste soporta.

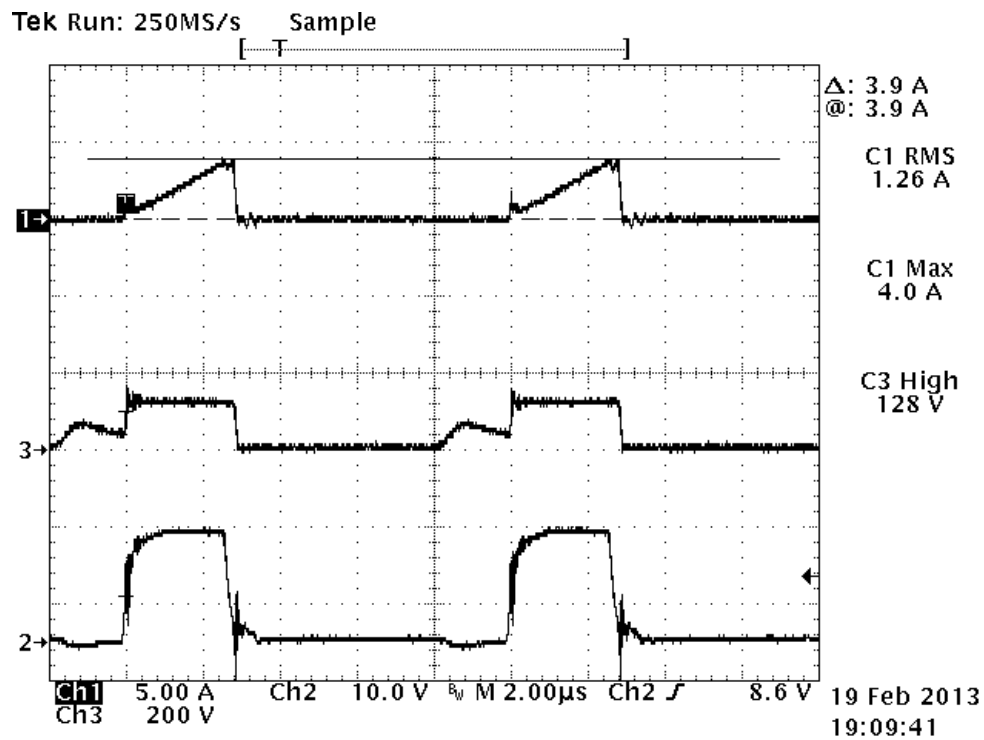


Fig. 27 – Corriente por el transistor y tensión por el diodo de salida

Combinando las dos imágenes anteriores, podemos diferenciar los tres estados de funcionamiento de la flyback como podemos ver en la Fig. 28.

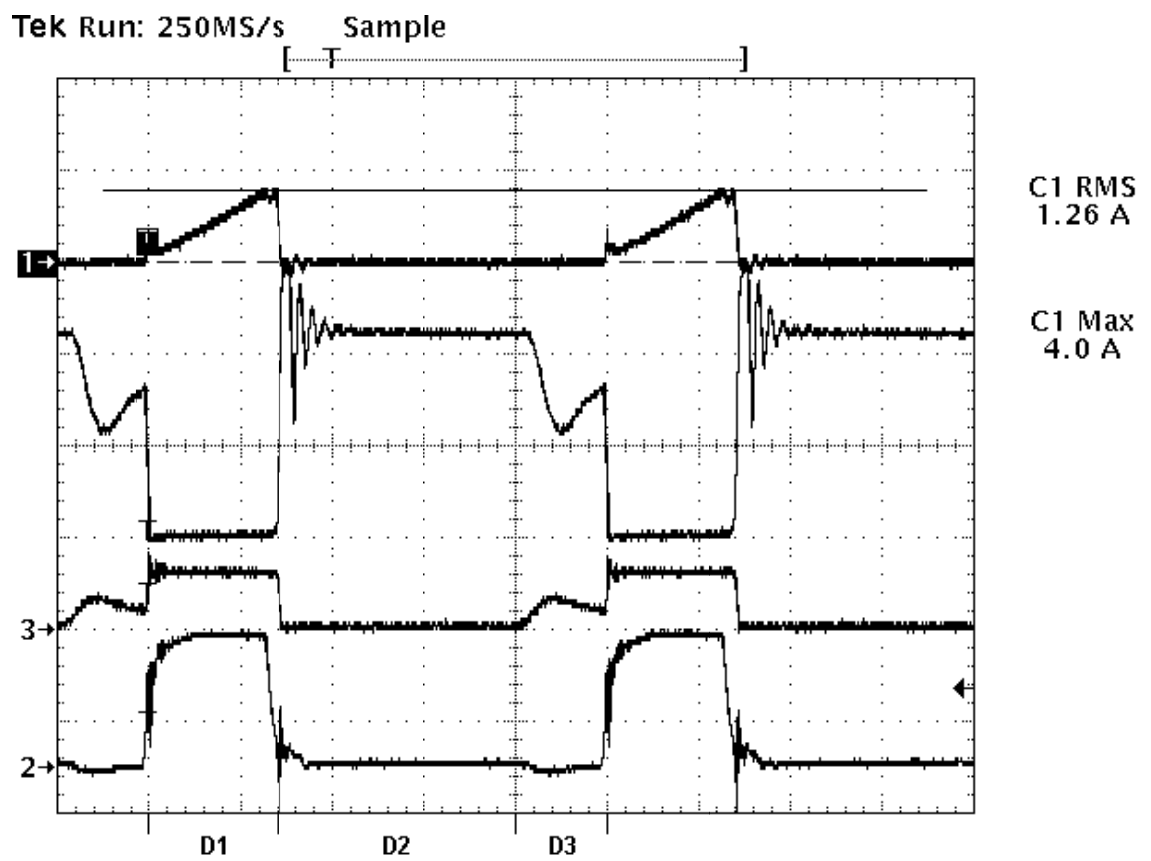


Fig. 28 – Demostración de modo de funcionamiento discontinuo DCM

#### 4.5 - DISEÑO Y MONTAJE DE LA PLACA.

El diseño de la placa se ha realizado con el programa *EAGLE 6.2.0*.

Se ha diseñado una placa de un tamaño de 140x72x50 mm.

La etapa final en el diseño de cualquier etapa de potencia es el diseño físico del circuito impreso (PCB). Si se diseña de forma inadecuada, el PCB puede contribuir a la inestabilidad del cargador y radiar interferencias electromagnéticas de forma excesiva (EMI).

El cargador contiene señales de alta frecuencia y una pista inadecuada del PCB puede funcionar como antena. La longitud y la anchura de las pistas afectan a su resistencia e inductancia, lo cual afecta a su respuesta en frecuencia. Todas las pistas que sean atravesadas por corrientes AC deben de ser lo más cortas y anchas posibles.

En una etapa flyback hay cuatro bucles de corriente. Estos bucles deben de estar separados. [5]

Los bucles son:

- Entrada de alimentación en AC.
- Interruptor de potencia.
- Salida del transformador.
- Salida hacia la carga.

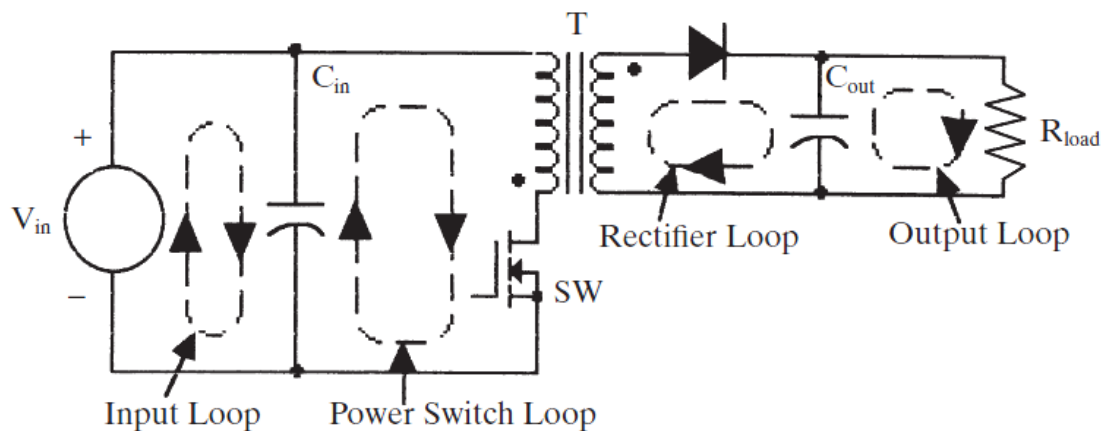


Fig. 29 – Bucle de corriente en la etapa flyback [5]

Conforme el diseño va avanzando llega el momento de empezar a pensar en proteger al cargador de posibles fallos que puedan dañarlo y también de instalar un conjunto de componentes que nos ayuden a proteger a nuestro equipo para disminuir la magnitud de las perturbaciones electromagnéticas que pueda emitir.



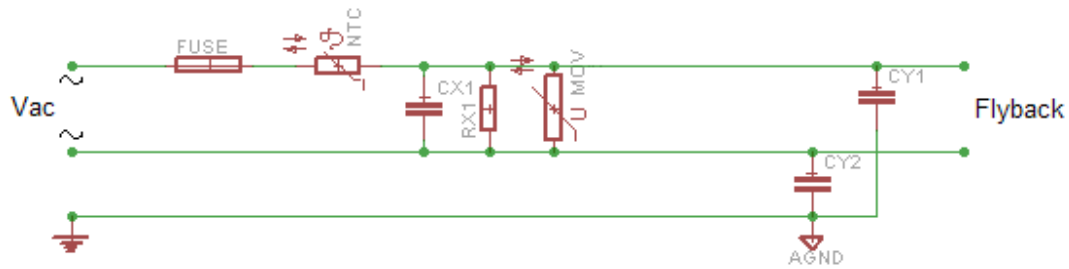


Fig. 30 – Filtro de entrada y componentes de seguridad eléctrica

Como componentes de seguridad hay instalados en la entrada de AC un fusible, una NTC y un varistor:

- El fusible tiene como finalidad proteger al equipo en caso de cortocircuito.
- La NTC sirve para limitar la corriente de conexión.
- El varistor funciona como un pequeño circuito de clamp que actuará ante picos transitorios de tensión en la entrada AC.

En cuanto a la compatibilidad electromagnética hay instalador un condensador Cx con su resistencia de descarga y 3 condensadores Cy. [17]

- Condensador Cx: Actúa como filtro. Este tipo de condensadores se usan solo en posiciones donde un fallo del condensador no pueda exponer a las personas a riesgos de shock eléctrico.
- Condensadores Cy1 y Cy2: Se usan donde un fallo del condensador podría exponer a personar a un shock eléctrico. Estos condensadores están conectados entre fase y toma de tierra y neutro y toma de tierra. El valor de los condensadores está limitado a la corriente de fuga que el sistema pueda permitir, normalmente entre 0.25 y 3.5 mA.
- Tenemos otro condensador Cy conectando las masas de los dos lados del transformador.

El circuito impreso por ambas caras queda de la siguiente manera:

Cara Bottom:

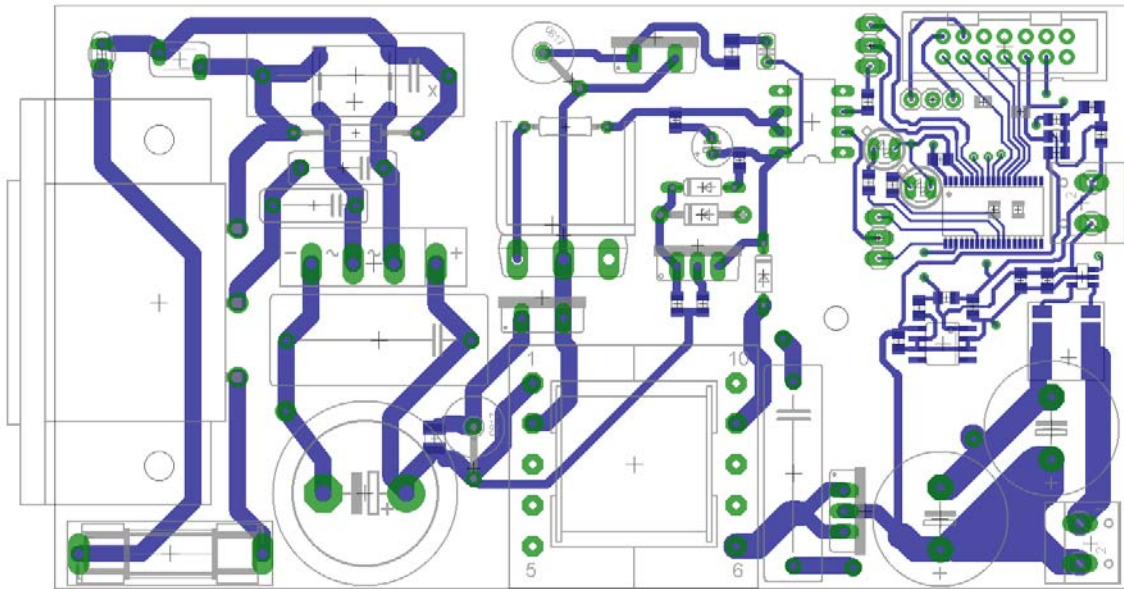


Fig. 31 - Cara bottom diseñada

Cara top

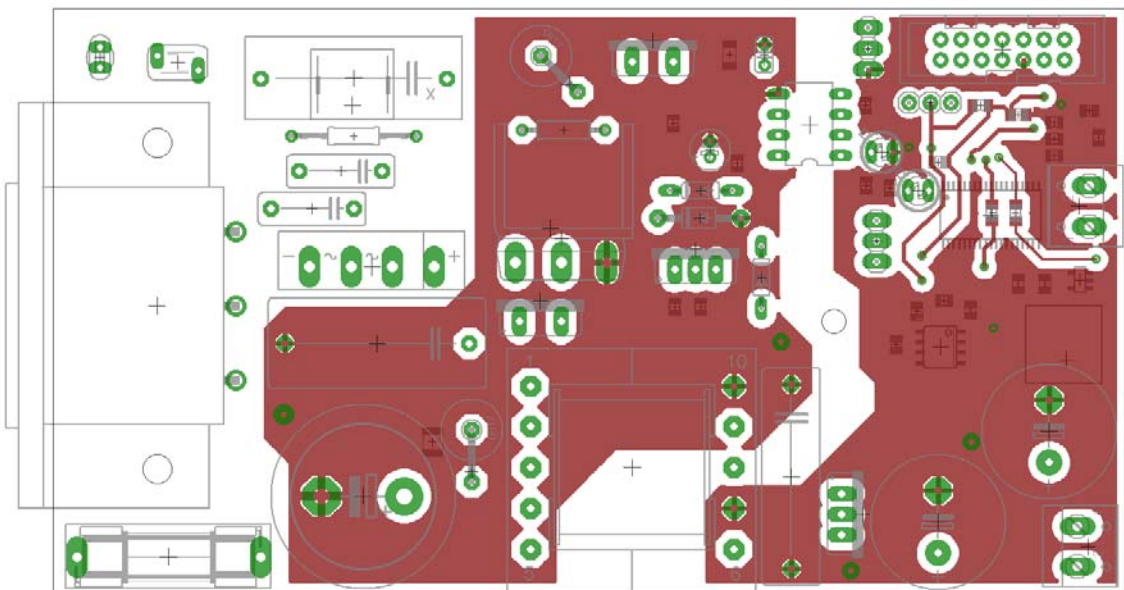


Fig. 32 - Cara top diseñada

Este es el diseño fabricado y actualmente en uso.

Una vez montados todos los componentes queda construido el pcb.

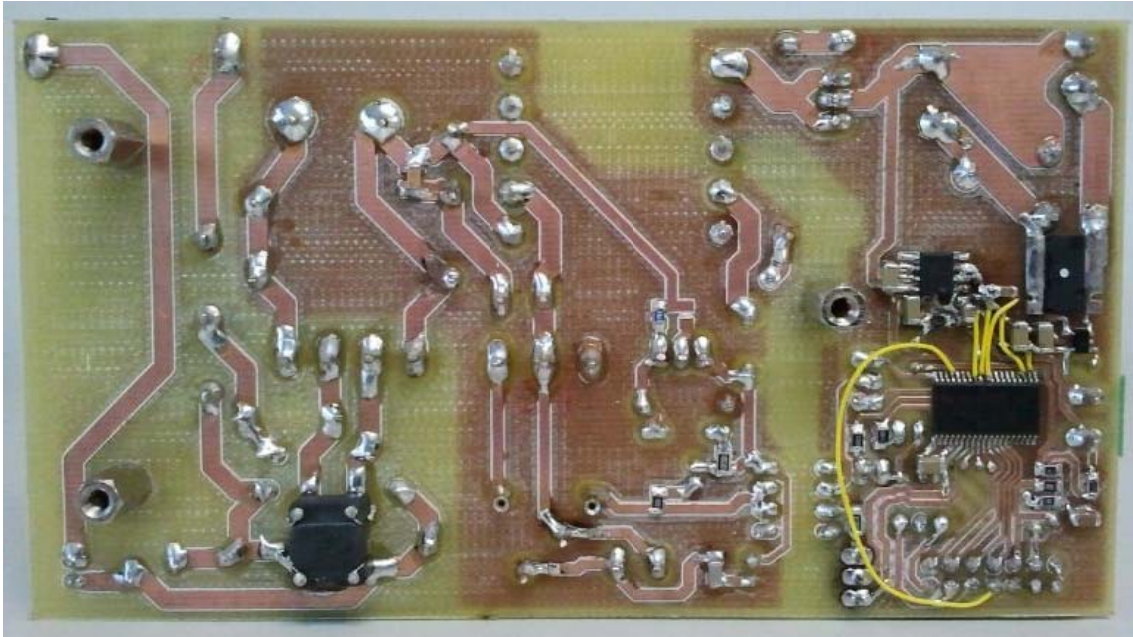


Fig. 33 - Cara bottom fabricada



Fig. 34 - Cara top fabricada



CARGADOR DE PAQUETES DE BATERÍAS DE NIMH DE 24V, 10AH PARA  
VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

---

CAPÍTULO 5 PRESUPUESTO

### 5.1 - ESTIMACIÓN Y CONTROL DE COSTES

A continuación se desglosa una lista de los materiales utilizados en el proyecto, con precios de los componentes obtenidos de <http://es.farnell.com>.

Se ha hecho una diferenciación entre el presupuesto necesario para fabricar un solo cargador y otro presupuesto para la fabricación de 250 cargadores en serie. Respecto a los componentes, es un presupuesto bastante por lo alto, porque no se ha buscado optimizar el coste de los componentes, sino asegurar el funcionamiento “sin complicaciones” para el prototipo fabricado. El coste de algunos de los componentes más caros (transistor y algunos diodos y condensadores) se podría reducir fácilmente ajustando sus especificaciones. Por otro lado, no se ha tenido en cuenta el coste de fabricación y montaje de la placa de circuito impreso.

Componente	Descripción	Unidades	Precio/ud	Precio/250 ud	Precio 1 cargador	Precio 250 unidades
Rx	Resistencia EMI	1	0,0012	0,0005	0,0012	0,125
Rarr1	R arranque	1	0,009	0,003	0,009	0,75
Rarr2	R arranque	1	0,015	0,008	0,015	2
Rarr3	R arr3	1	0,009	0,003	0,009	0,75
Rclp	R clamp	1	0,75	0,7	0,75	175
Rsn	R snubber	1	0,66	0,57	0,66	142,5
Rin2_1	R sensor tensión	1	0,009	0,003	0,009	0,75
Rin2_2	R sensor tensión	1	0,009	0,003	0,009	0,75
Rshunt	R shunt	1	0,76	0,49	0,76	122,5
Rin1_1	R sensor NTC	1	0,009	0,003	0,009	0,75
Rin1_2	R sensor NTC	1	0,009	0,003	0,009	0,75
Ruc	R $\mu$ controlador	1	0,009	0,003	0,009	0,75
Rin1	R in sensor- $\mu$ c	1	0,009	0,003	0,009	0,75
Rin2	R in sensor- $\mu$ c	1	0,009	0,003	0,009	0,75
Rin3	R in sensor- $\mu$ c	1	0,009	0,003	0,009	0,75
Rled1	R led	1	0,009	0,003	0,009	0,75
Rled2	R led	1	0,009	0,003	0,009	0,75
Ropto	R $\mu$ c-opto	1	0,009	0,003	0,009	0,75
Rmos	R disparo mos	1	0,015	0,009	0,015	2,25
R3	R mosfet2	1	0,009	0,003	0,009	0,75
Cx	Cx EMI	1	0,64	0,64	0,64	160
Crect	C rectificador	1	5,25	2,72	5,25	680
Cmkp	Cmkp	1	2,73	1,63	2,73	407,5
Cb	C bias	1	0,126	0,072	0,126	18
Cclp	C clamp	1	0,18	0,048	0,18	12
Csnb	C snubber	1	0,4	0,154	0,4	38,5
Co	C salida	2	3,27	0,91	6,54	455
Cdesin2	C in sensor- $\mu$ c	1	0,12	0,08	0,12	20
Cdesin1	C in sensor- $\mu$ c	1	0,12	0,08	0,12	20
C33	C micro	1	0,12	0,08	0,12	20
Cina	C ina	1	0,12	0,08	0,12	20

Capítulo 5 Presupuesto

<b>Ctemp</b>	C in sensor-μc	1	0,12	0,08	0,12	20
<b>Cuc</b>	C micro	1	0,12	0,08	0,12	20
<b>Cin3V3</b>	C regulador	1	0,12	0,08	0,12	20
<b>Cy</b>	C EMI	1	0,94	0,68	0,94	170
<b>CtIp</b>	C driver	1	0,0015	0,01	0,0015	2,5
<b>Cyemi</b>	Cy emi	2	0,31	0,145	0,62	72,5
<b>Nucleo</b>	E30/15/7	1	0,47	0,41	0,47	102,5
<b>Transistor</b>	NMOS 800V	1	5,64	4,12	5,64	1030
<b>Do</b>	Diodo salida	1	3,29	1,64	3,29	410
<b>Dsn</b>	Diodo snubber	1	5,25	4,32	5,25	1080
<b>Dclp</b>	Diodo clamp	1	7,12	3,25	7,12	812,5
<b>Dz</b>	Zener arranque	1	0,17	0,072	0,17	18
<b>Dbias</b>	Diodo bias	1	1,05	0,73	1,05	182,5
<b>Darr</b>	Diodo arranque	1	0,85	0,53	0,85	132,5
<b>Qarr</b>	Transistor arranque	1	0,91	0,91	0,91	227,5
<b>Puente</b>	Puente rectificador	1	0,71	0,43	0,71	107,5
<b>TLP250</b>	Driver disparo NMOs	1	1,59	0,8	1,59	200
<b>INA194</b>	Monitor de shunt	1	2,55	1,16	2,55	290
<b>Reg3,3</b>	Regulador 3,3V	1	1,19	0,67	1,19	167,5
<b>Entrada</b>	Conector alimentación	1	1,05	0,78	1,05	195
<b>NTC</b>	NTC seguridad entrada	1	1,22	0,79	1,22	197,5
<b>Msp430 F5152</b>	Microcontrolador	1	1,5	1	1,5	250
<b>Fusible</b>	Fusible protección	1	0,165	0,112	0,165	28
<b>Varistor</b>	Varistor protección	1	0,37	0,33	0,37	82,5
<b>Led</b>	Indicadores luminosos	2	0,4	0,13	0,8	65
<b>Caja</b>	Caja protectora	1	15	7	15	1750
<b>Cable</b>	Cable alimentación	1	1,05	0,55	1,05	137,5
<b>Total</b>			<b>72,5397 40,3075</b>			

Tabla 16 – Presupuesto del proyecto





## CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES

## **6.1 - CONCLUSIONES**

El presente proyecto contribuye al desarrollo de un tipo de cargadores inteligentes poco comunes en el mercado actual. Este campo de trabajo responde al elevado interés en crear cargadores inteligentes que carguen las baterías de una forma rápida y eficaz.

Mirando en perspectiva el proyecto realizado se puede ver que ha sido un trabajo complejo en el que se han tenido que solucionar multitud de problemas en áreas de la electrónica completamente diferentes. Primero, el diseño de la etapa de potencia, donde nos hemos encontrado con multitud de problemas para conseguir un diseño óptimo. Más tarde, el diseño del PCB atendiendo a una gran cantidad de normas de ruteado, posicionamiento de componentes, distribución de los diferentes sistemas en la placa etc. Y por último, terminando con la programación de un microcontrolador que sea capaz de utilizar todos estos circuitos para realizar una carga de batería eficiente e intentando asegurar la vida útil de la batería.

Se partía con el objetivo de intentar mejorar los cargadores que se encuentran actualmente en el mercado sin que esto afectase al precio del producto diseñado. Ciertamente se ha podido conseguir, con el inconveniente del aumento del volumen del cargador en comparación con la competencia actual.

A partir de un extenso proceso de análisis, diseño, simulación y fabricación podemos llegar a las siguientes conclusiones:

- Se ha conseguido diseñar y poner en funcionamiento la etapa flyback en el modo de funcionamiento esperado.
- Las formas de onda coinciden básicamente con las esperadas, salvo algunas sobreoscilaciones o sobretensiones, consecuencias de los elementos parásitos que presentan los componentes reales.
- El rendimiento obtenido alcanza los valores habituales de este tipo de convertidores.
- La principal ventaja que presenta este tipo de cargadores frente a sus competidores es el mayor control enfocado a mejorar la carga de las baterías.

Cabe destacar el desarrollo de una metodología de diseño aplicable a diferentes tipos de baterías atendiendo simplemente a unas consideraciones de dimensionado concretas dependiendo del índice de carga y el material de las mismas.

## **6.2 - LÍNEAS FUTURAS**

Durante el desarrollo de este trabajo se han ido identificando nuevas líneas de trabajo, así como algunas propuestas encaminadas a mejorar el sistema desarrollado.

Estas sugerencias se resumen a continuación.

- Las principales líneas de investigación de este trabajo estarían encaminadas a aplicar un índice de carga mayor para poder cargar la batería en un tiempo menor.
- Otra línea de evolución hace referencia a un diseño de la placa más eficiente redibujando las pistas críticas e intentando disminuir el tamaño total del cargador.
- En el afán de mejorar el estudio realizado, se propone desarrollar un nuevo circuito de arranque junto con el circuito auxiliar para reducir el consumo de ambos.
- Otra línea de evolución hace referencia a implementar un control inteligente que sea capaz de detectar si la batería a cargar es de NiCd o de Ni-HM pudiendo aplicar las diferentes formas de carga dependiendo del material.
- La medida y rediseño del filtro de perturbaciones electromagnéticas y el aumento de las medidas de seguridad.
- Modificación del firmware del microcontrolador para incluir una comunicación serie con un ordenador que transmita los parámetros de la batería y pueda servir como data-logger.



CAPÍTULO 7 REFERENCIAS

## 7.1 - REFERENCIAS

- [1] Tenergy Smart Universal Charger (3.5A) for NiMH/NiCd Battery Packs: 19.2v - 24v. [Online]. <http://www.all-battery.com/TenergySmartUniversalChargerforNiMHandNiCdBatteryPacks19.2vto24v3.5a-01039.aspx>
- [2] CBA IV Computerized Battery Tester and AnalyzerAzimut Marine.. [Online]. <http://www.azimutmarine.es/nautica/electricidad/analizadores-de-baterias/analizadores-de-baterias.html> <http://www.all-battery.com/cbaIVcomputerizedbatterytesterandalyzer--40a150watts-52026.aspx>
- [3] UBA5 Battery Analyzer. [Online]. <http://www.vencon.com>
- [4] Power Integrations, TOPSwitch Flyback Design Methodology, Application Notes.
- [5] Marty Brown, *Power Supply Cookbook.*: NEWNES, 2001.
- [6] Ukai. <http://www.ukai.com/baterias-plomo/>.
- [7] Marshall Brain. <http://electronics.howstuffworks.com/everyday-tech/lithium-ion-battery.htm>.
- [8] José Antonio Alonso Alonso. <http://www.icmm.csic.es/jaalonso/velec/baterias/bateria.htm>.
- [9] [http://batteryuniversity.com/learn/article/charging\\_nickel\\_metal\\_hydride](http://batteryuniversity.com/learn/article/charging_nickel_metal_hydride).
- [10] Batteries in a Portable World. <http://www.buchmann.ca>.
- [11] A. Martinez, Fuentes de alimentación electrónicas, , <http://psfunizar7.unizar.es/br13/egAsignaturas.php?codigo=18140&Identificador=3453>.
- [12] Robert W. Erickson y Dragan Maksimovic, *Fundamentals of Power Electronics.*: KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS, 2004.
- [13] Fairchild, Application Note AN-4147.
- [14] Ramón Pallás Areny, *Sensores y acondicionadores de señal.*: MARCOMBO, S.A., 2003.
- [15] Texas Instruments, "MSP430 Hardware Tools,".
- [16] [http://www.st.com/internet/com/TECHNICAL\\_RESOURCES/TECHNICAL\\_LITERATURE/DATASHEET/CD00226154.pdf](http://www.st.com/internet/com/TECHNICAL_RESOURCES/TECHNICAL_LITERATURE/DATASHEET/CD00226154.pdf).
- [17] Power Integrations, TOPSwitch Power Supply Design Techniques for EMI and Safety AN-15.

